EL NACIMIENTO DEL TIEMPO

Ilya Prigogine

METATEMAS 23

LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

EL NACIMIENTO DEL TIEMPO Ilya Prigogine

¿Cuántas preguntas fundamentales para la comprensión del universo en que vivimos quedan sin respuesta simplemente porque, al sentirnos ajenos al conocimiento especializado y al lenguaje del científico, no nos atrevemos a formular? Son ya bastantes los libros de esta **Colección Metatemas** que se publican precisamente con la intención de facilitar esta comunicación. Con este libro, por ejemplo, **El nacimiento del tiempo**, de un **Premio Nobel de Química**, podremos finalmente preguntar con toda sencillez y claridad: **¿tiene el tiempo un «principio»? ¿Cómo apareció el tiempo en el universo? ¿Qué es la irreversibilidad?** Y también, **¿cuál es el futuro de nuestro universo?**

Precedidos por una larga entrevista introductoria, que tiene el valor de una pequeña autobiografía científica, se recogen aquí **dos conferencias** recientes de **Ilya Prigogine** sobre uno de los temas centrales de su investigación científica: **el tiempo**, ya que sobre él funda el autor su convicción de que nuestra época es testigo de una revolución científica cuya importancia es, si no mayor, sí en todo caso igual a la copernicana. Afirma Prigogine: «En cierto modo, Einstein se ha convertido, contra su voluntad, en el Darwin de la física. Darwin nos ha enseñado que el hombre está sumergido en la evolución biológica; Einstein nos ha enseñado que estamos sumergidos en un universo en evolución». Lo que ha entrado en crisis es, pues, el punto de vista atemporal de la física clásica que rechazaba la irreversibilidad como «ilusión» y, como tal, no permitía la investigación científica. El alcance de los problemas que implican esta ruptura epistemológica es enorme, y no atañen tan sólo a la física, sino también a la biología, la química, la ecología, la cosmología y la situación misma del hombre en el universo.

Foto de Ilya Prigogine: © Kim Manresa

TUSQUETS EDITORES

ISBN-84-7223-291-1

9 788472 232921

Ilya Prigogine nació en Moscú en 1917. Estudió física y química en la Universidad Libre de Bruselas, donde se doctoró en 1941. Se ha dedicado sobre todo al estudio de los fenómenos irreversibles, introduciendo nuevos conceptos como los de «estructura disipativa», *subdynamics* o *casual dynamics*. En 1977 recibió el **Premio Nobel de Química**. Entre sus obras más conocidas y traducidas en el mundo entero, destacamos *La nueva alianza* (en colaboración con Isabelle Stengers), *Del ser al devenir* y **¿Tan sólo una ilusión? (Una exploración del caos al orden)** (Metatemas 3).

creative commons

א*
Metatemas
Libros para pensar la ciencia
Colección dirigida por Jorge Wagensberg

* Alef, símbolo de los números transfinitos de Cantor

Ilya Prigogine

EL NACIMIENTO DEL TIEMPO

Tusquets Editores

Título original: *La nascita del tempo*

1.ª edición: febrero 1991
2.ª edición: junio 1993
3.ª edición: octubre 1998

© 1988 Edizioni Theoria s.r.l., Roma-Nápoles

© de la traducción: Josep María Pons
Diseño de la colección: B.M.
Reservados todos los derechos de esta edición para
Tusquets Editores, S.A. - Cesare Cantù, 8 - 08023 Barcelona
ISBN: 84-7223-292-1
Depósito legal: B. 40.105-1998
Impreso sobre papel Offset-F. Crudo de Leizarán, S.A. - Guipúzcoa
Impresión: A & M Gràfic, S.L.
Impreso en España

Indice

P. 7 Presentación
9 Nota biográfica

19 Conversación de Ottavia Bassetti con Ilya Prigogine

41 El nacimiento del tiempo
47 1. La irreversibilidad a nivel macroscópico
53 2. La irreversibilidad microscópica
63 3. La irreversibilidad en cosmología
75 4. El nacimiento del tiempo

79 El papel creativo del tiempo

Presentamos al lector el texto de dos breves conferencias sobre el mismo tema, el tiempo, dadas por Ilya Prigogine a pocos años de distancia una de la otra. Originadas ambas por una invitación de la empresa Montedison, tienen solamente del escrito circunstancial la frescura y el tono de divulgación obligados por las limitaciones del medio: una exposición oral para un auditorio no especializado. Con el mérito añadido de ofrecer, en pocas páginas y sin el auxilio de complejos aparatos matemáticos, con gran claridad, las sólidas tesis de su autor. Esto es lo que nos ha convencido de la utilidad de la publicación conjunta de las dos conferencias. La breve nota biográfica y el texto de la conversación que las preceden introducirán al lector en la compleja problemática que nos presenta Prigogine.

Nota biográfica

Ilya Prigogine nace el 25 de enero de 1917 en Moscú. Debido al cambio de régimen, la familia abandona Rusia en 1921; después de unos años de traslados por Europa y una breve estancia en Alemania, en 1929 se establece definitivamente en Bélgica, concretamente en Bruselas, donde el joven Prigogine cursa los estudios de enseñanza media y superiores. Bélgica pasará a ser desde entonces su patria de adopción; en el año 1949 le será concedida la nacionalidad belga.

En Bruselas estudia química y física en la Université Libre, donde se licencia en 1941. En estos años Prigogine recibe la influencia intelectual de dos de sus profesores, Théophile de Donder, doctor en ciencias físicas y titular de un curso de termodinámica teórica, y Jean Timmermans, experimentador interesado en las aplicaciones de la termodinámica clásica a las soluciones líquidas y, más en general, a los sistemas complejos.

Después de conseguir la licenciatura inicia su actividad de investigador en la Université Libre, pero pronto se ve obligado a interrumpirla a cau-

sa del cierre de la universidad que sigue a la ocupación alemana.

Entretanto sus intereses científicos se concentran en el estudio de los fenómenos irreversibles. En este período Prigogine empieza a considerar el papel esencial de los fenómenos irreversibles en los seres vivientes. Tales investigaciones confluyen en su tesis, presentada en 1945 en la Université Libre con el título de *Étude Thermodynamique des Phénomènes irreversibles.*[1] Con esta obra puede decirse que tiene su inicio el largo proceso de elaboración que llevará a Prigogine a formular en 1967, más de veinte años después, el concepto de estructura disipativa.

La importancia de su obra viene siendo reconocida mientras tanto en una esfera cada vez más amplia, y en 1959 es nombrado director de los Instituts Internationaux de Physique et Chimie Solvay.

En 1967 Prigogine introduce explícitamente el concepto de estructura disipativa en una comunicación titulada Structure, Dissipation and Life. En este momento ya se ha dado cuenta de que al lado de las estructuras clásicas del equilibrio aparecen también, a suficiente distancia del equilibrio, estructuras disipativas coherentes. Este tema es tratado a fondo en un libro escrito por Prigogine en 1971 juntamente con Paul Glans-

1. Véase en castellano la obra *Introducción a la termodinámica de los procesos irreversibles*, Selecciones Científicas, Madrid, 1974.

dorff, con el título de *Structure, Stabilité et Fluctuations.*

Mientras tanto, la reputación científica de Prigogine, ya sea como teórico o como experimentador, también se difunde fuera de Europa. Por esta razón no constituye ninguna sorpresa su nombramiento de director del Center for Statistical Mechanics and Thermodynamics de la Universidad de Texas (Austin).

El reconocimiento más significativo del valor de su actividad en el ámbito del estudio de los procesos irreversibles y de la termodinámica de los sistemas complejos le llega a Prigogine, ya ganador del Premio Solvay en 1965, con el Premio Nobel de Química en 1977. Del mismo año es la publicación de una obra fundamental.para la comprensión de su pensamiento, *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems,* escrita en colaboración con G. Nicolis.

De la variedad y la vivacidad de los intereses intelectuales de Prigogine dan testimonio las audaces tentativas de llevar las propias ideas, y sobre todo la intuición del papel fundamental de la irreversibilidad para los procesos de autoorganización espontánea, a campos distintos del físico-químico. Según Prigogine, en condiciones alejadas del equilibrio, la materia tiene la capacidad de percibir diferencias en el mundo exterior y de reaccionar con grandes efectos a pequeñas fluctuaciones. Aunque sin llevarla hasta el fondo, Prigogine sugiere la posibilidad de una analogía con los sistemas sociales y con la historia. Fruto de

estas reflexiones es el libro escrito en 1979 con Isabelle Stengers, *La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la Science.*[2] Este libro, seguramente el más conocido entre el público no especializado, mantiene, desde el título, un vínculo ideal con un texto que a su vez había suscitado un amplio debate, *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne,*[3] escrito en 1970 por Jacques Monod, biólogo molecular francés, Premio Nobel en 1965. Según Monod, la llegada de la ciencia moderna ha separado el reino de la verdad objetiva del de los valores, produciendo la angustia que caracteriza nuestra cultura. El único camino que todavía podemos recorrer es el de la aceptación de una austera ética del conocimiento; con tal propósito escribe Monod: La antigua alianza está rota; el hombre sabe al fin que está solo en la inmensidad indiferente del Universo en donde ha emergido por azar. Igual que su destino, su deber no está escrito en ninguna parte. A él le toca escoger entre el Reino y las tinieblas.

Prigogine, que afirma haber sido muy influido por el libro de Monod, en *La Nueva Alianza* admite que el bioquímico francés ha tratado con rigor y coherencia las consecuencias filosóficas de la ciencia clásica, que pretende determinar las leyes universales de una naturaleza vista como un mecanismo simple e irreversible (el modelo

2. Véase más adelante, pág. 22, nota 1.
3. Véase más adelante, pág. 34, nota 8.

mecanicista del «mundo reloj»). Sin embargo la actual perspectiva científica, sostiene Prigogine, nos ofrece una imagen muy distinta: los procesos irreversibles ponen en juego las nociones de estructura, función, historia. En esta nueva perspectiva, la irreversibilidad es fuente de orden y creadora de organización. Por esta razón el mundo del hombre no es visto como una excepción marginal en el universo: bajo el signo de la recuperación de la importancia del tiempo y de los procesos irreversibles se puede reconstituir una nueva alianza entre el hombre y la naturaleza.

En definitiva, «si está muerta y sepultada la antigua alianza, la alianza animista..., el mundo finalizado», es también verdad para Prigogine que «nuestro mundo tampoco es el mundo de la "moderna alianza". No es el mundo silencioso y monótono, abandonado por los antiguos hechizos, el mundo-reloj sobre el cual nos ha sido asignada la jurisdicción». La conclusión de Prigogine es ciertamente un reconocimiento de la importancia de los problemas planteados por Monod, pero también, al mismo tiempo, una invitación a la superación de la posición del biólogo francés: «Jacques Monod tenía razón: Ya es hora de que asumamos los riesgos de la aventura humana... ya es hora para nuevas alianzas, alianzas establecidas desde siempre, por tanto tiempo ignoradas, entre la historia de los hombres, de su sociedad, de sus saberes y la aventura exploradora de la naturaleza. En esta perspectiva de reconciliación de las dos culturas, el saber científico deviene

una audición poética de la naturaleza y contemporáneamente un proceso natural en la naturaleza, proceso abierto de producción y de invención, en un mundo abierto, productivo e inventivo».

La Nueva Alianza recorre las etapas principales de desarrollo de la ciencia moderna. Según Prigogine, aunque en tiempos de Newton la ciencia opere una separación entre mundo del hombre y naturaleza física, comparte con la religión el interés en encontrar leyes físicas universales que testimonian la sabiduría divina. Así pues, si bien la ciencia moderna nace de la ruptura de la antigua alianza animista con la naturaleza, instaura otra alianza con el Dios cristiano, legislador racional del universo.

Pero muy pronto la ciencia está en condiciones de prescindir del socorro teológico, y Prigogine indica en la imagen del demonio omnisciente de Laplace el símbolo de la nueva ciencia: Dios, para usar una expresión del propio Laplace, ya no es una hipótesis necesaria.

A juicio de Prigogine, incluso la revisión crítica de Kant es sólo un giro aparente, porque si bien es verdad que en la filosofía kantiana el sujeto impone la ley a la naturaleza a través de la ciencia, también es verdad que con Kant viene sancionada la distinción entre ciencia y verdad, y con ella la separación entre las dos culturas.

La reconstrucción de Prigogine ve abrirse el siglo XIX con un acontecimiento inesperado y decisivo: en 1811 Jean Joseph Fourier gana el premio de la Academia por el tratamiento teórico

de la propagación del calor en los sólidos. Este hecho puede ser considerado como el acta de nacimiento de la termodinámica, ciencia matemáticamente rigurosa pero decididamente «no clásica», extraña al mecanicismo. Según Prigogine, desde aquel momento se instauran dos universales en física: la gravitación y el calor.

El impacto tecnológico de la termodinámica es enorme. Pero hay que esperar hasta 1865 para que Clausius, con el concepto de entropía, le extraiga las consecuencias en el plano cosmológico. Los éxitos finales que la nueva ciencia del calor hace entrever son la disipación de la energía, la irreversibilidad y la evolución hacia el desorden.

Pero en el siglo XIX sólo llega a ser considerado el estadio último de los procesos termodinámicos. En esta termodinámica del equilibrio, los procesos irreversibles son arrinconados como objetos no dignos de estudio.

La última parte de *La Nueva Alianza* muestra cómo es posible establecer un puente entre la concepción estática de la naturaleza y la concepción dinámica, entre universo gravitacional y universo termodinámico. Ello implica una drástica revisión del concepto de tiempo que en la ciencia actual ya no es solamente un parámetro del movimiento, sino que «mide evoluciones internas hacia un mundo en no-equilibrio».

Prigogine nos dice que el universo accesible a nuestras investigaciones ha estallado y que el tiempo ha adquirido una nueva imagen: «Ironía

de la historia: en cierto sentido Einstein ha resultado ser, contra su voluntad, el Darwin de la física. Darwin nos ha enseñado que el hombre está inmerso en la evolución biológica; Einstein nos ha enseñado que estamos inmersos en un universo en evolución». También a través de la reconsideración de las críticas dirigidas a la ciencia por un pensador «incómodo» como Bergson se llega a la superación de la división entre las dos culturas. De esta manera Prigogine desmonta la conclusión pesismista de Monod para proponer la imagen de un universo en el cual la organización de los seres vivientes y la historia del hombre ya no son accidentes extraños al devenir cósmico.

Suscitada por los más recientes resultados científicos, la reflexión crítica de Prigogine se resuelve finalmente en una nueva imagen de la misma ciencia: «Cada gran era de la ciencia ha tenido un modelo de la naturaleza. Para la ciencia clásica fue el reloj; para la ciencia del siglo XIX... fue un mecanismo en vías de extinción. ¿Qué símbolo podría corresponder a nuestra época? Tal vez la imagen que usaba Platón: la naturaleza como obra de arte».

Tras la publicación de *La Nueva Alianza*, Prigogine no ha cesado de profundizar en las temáticas científicas implicadas en el concepto de estructura disipativa. Estas se han ampliado actualmente a otros campos, biología y meteorología sobre todo, y son conducidas por grupos de investigación, guiados por Prigogine, ya en la

Université Libre, ya en el Center for Statistical Mechanics and Thermodynamics de Austin.

En 1978 Prigogine ha publicado *From Being to Becoming*.

Conversación de Ottavia Bassetti con Ilya Prigogine

Profesor Prigogine, usted nace en Moscú en 1917, el año de la revolución, pero cuando tiene cuatro años su familia abandona Rusia y se desplaza a través de Europa, para establecerse en Bélgica en 1929. Refiriéndose a aquellos años, usted se ha descrito alguna vez como un adolescente interesado por la historia, por la arqueología, por la música, apasionado por la filosofía. ¿Por qué, en cambio, en el momento de matricularse en la universidad prefiere estudiar química y física?

Creo que deberían tenerse en cuenta dos formas distintas de inestabilidad que se han sumado la una a la otra. En primer lugar la inestabilidad de la adolescencia, cuando se busca la propia vocación: aquellas cosas que entonces pueden parecer pequeñas mutaciones, a la larga traen consecuencias notables. Mi hermano, que me lleva cuatro años, había estudiado química, y también mi padre era ingeniero químico, pero en casa, tal vez porque yo hablaba mucho, se daba por supuesto que estudiaría derecho. Yo

mismo estaba convencido de ello, pero, curiosamente, en cierto momento empecé a acercarme a la psicología, la psicología me llevó a la biología, y de aquí el paso a la física y a la química fue realmente breve. Así descubrí campos que ignoraba totalmente, muy lejanos del griego, del latín y, más en general, de los estudios humanísticos clásicos en los que estaba metido en aquella época. Al principio me encontraba más bien sorprendido al penetrar en un universo que apenas conocía, y tal vez fue en aquel momento cuando sentí ganas de profundizar: ésta es la que yo llamaría la inestabilidad de la adolescencia.

A esta inestabilidad de la adolescencia se juntó la inestabilidad del período anterior a la guerra. En aquel momento todos sentíamos su inminencia que, evidentemente, nos ponía frente a graves interrogantes. ¿Qué profesión se podía escoger en tiempos tan difíciles e inciertos?

La vida del arqueólogo o del músico parecían entonces más arriesgadas que las del físico o del químico. Es quizás todo este conjunto de consideraciones lo que me llevó a escoger la química y la física.

En 1941 usted consigue el doctorado e inicia su actividad de investigador. ¿Qué significa ocuparse de la investigación en plena segunda guerra mundial?

Para responder tengo que precisar algunos hechos. En 1940 intenté alcanzar el sur de Francia, como casi todos los jóvenes belgas, pero los alemanes ya nos habían cortado el camino, y así, como muchos de mis compañeros, tuve que volver a Bélgica.

Hay que decir que, en aquel momento, la mayoría de mis profesores de la universidad pensaban que la guerra estaba prácticamente terminada, que Alemania había vencido y que, por tanto, lo único que podía hacerse era adaptarse a la nueva situación. Por esta razón, en un primer momento, proseguí mi trabajo de investigación y presenté mi tesis de doctorado.

Pero poco después de la tesis, la Université Libre de Bruselas interrumpió su actividad. Hasta aquel momento había tenido un discreto margen de autonomía, pero después las pretensiones del comisario alemán llegaron a ser tales que obligaron a la universiad a cerrar.

Así surgió un nuevo problema, el de continuar enseñando a los estudiantes, y entonces me metí de lleno en la actividad pedagógica clandestina. Fue mi primera experiencia práctica; se daban clases en las casas particulares, en las enfermerías de los hospitales, donde se podía.

No puedo decir, naturalmente, que me haya ocupado mucho de la investigación; el período transcurrido entre 1941 y el fin de la ocupación alemana fue sobre todo de reflexión, dominado por un gran acontecimiento como la segunda guerra mundial. A veces me pregunto si la insistencia

que sobre el tiempo hago en mis trabajos no proviene de alguna manera de mi vida de emigrado, en primer lugar, y después de esta experiencia que me ha hecho testigo de acontecimientos tan importantes. Los que viven en la segunda mitad del siglo XX no pueden darse cuenta de cómo era el mundo en los años cuarenta, cuando Mussolini, Hitler y Stalin se repartían gran parte del poder mundial.

Creo que haber pasado a través de aquellos años me ha dado una fuerte conciencia de la realidad del tiempo. Como recuerda a menudo Popper, el tiempo no puede ser una ilusión porque sería como negar Hiroshima. Y en cierta medida, cuando hablo de esta realidad del tiempo, tal vez estoy hablando de mi propia vida.

El tiempo-real de la biología y el tiempo-ilusión de la física son dos concepciones del tiempo sobre las cuales usted vuelve continuamente en su libro La Nueva Alianza,[1] *por ejemplo cuando habla de la polémica entre Bergson y Einstein. ¿Piensa que estas dos posiciones son siempre inconciliables?*

Antes de responder, quisiera en primer lugar insistir sobre el hecho de que el tiempo exterior

1. I. Prigogine-I. Stengers: *La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la science*, Gallimard, París, 1979. Hay versión castellana: *La Nueva Alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Alianza, Madrid, 1983.

a la física, empujado en cierto sentido fuera de la física, es en realidad un elemento común a Bergson y Einstein, y también a otros, por ejemplo Heidegger. Se trata de un problema que supera en gran medida la controversia entre Bergson y Einstein; para situarlo en su justo lugar hay que volver a las fuentes del pensamiento filosófico occidental.

Aristóteles dice que el tiempo es el estudio del movimiento, pero —añade— en la perspectiva del antes y del después.[2] Pero, ¿de dónde viene esta perspectiva del antes y del después?

Aristóteles no da una respuesta: afirma que tal vez es el alma la que efectúa la operación.

Einstein retoma la misma pregunta: ¿dónde está el tiempo?, ¿tal vez en la física? Y responde que no. En una conversación con Carnap dice textualmente: «El tiempo no está en la física».

Si escojo el punto de vista de la física, el tiempo, en cuanto reversibilidad, es ilusión y por tanto no puede ser objeto de la ciencia. En este punto, curiosamente, Einstein coincide con Bergson y con Heidegger: Bergson sostiene que el tiempo no puede ser objeto de la ciencia, porque es demasiado complejo para la ciencia.

Entonces, ¿por qué pienso yo en cambio que estamos entrando en un período de resistematización conceptual de la física? Porque hoy vemos fenómenos irreversibles en la naturaleza y com-

2. «El tiempo es el número del movimiento según el antes y el después». Aristóteles, *Física*.

prendemos el papel constructivo de estos fenómenos irreversibles. Vemos cómo se forman estructuras, vemos cómo algunas regiones del espacio se organizan gracias a la irreversibilidad.

Estos fenómenos irreversibles nos pueden dar ahora aquella perspectiva del antes y del después que buscaba Aristóteles. Nuestra tarea actualmente es la de incorporar esta irreversibilidad en la estructura fundamental de la ciencia.

Hoy, bien o mal, todos están de acuerdo sobre la importancia de la evolución en cosmología, en las partículas elementales, en biología, en las ciencias humanas; todos están de acuerdo en la importancia del tiempo.

Sin embargo, no hay acuerdo sobre un interrogante crucial: «¿Hay que reconsiderar las estructuras de base de la física? ¿No se debería poner la irreversibilidad en la base de la mecánica cuántica, de la mecánica clásica, de la relatividad, puesto que ya no podemos considerar el tiempo como una aproximación?». Deberíamos considerar el tiempo como aquello que conduce al hombre, y no al hombre como creador del tiempo. Este es en el fondo el punto en cuestión. Y sobre este punto, sin embargo, no hay unaminidad entre los físicos. Es un punto sobre el cual existen muchas y diversas opiniones.

Uno de mis mejores amigos y colegas, John A. Wheeler,[3] un eminente físico muy conocido, ha desarrollado el concepto de *«observer participancy description»* del universo. En esta des-

cripción es el observador, el hombre, la conciencia, lo que crea el tiempo, el cual no existiría en un universo sin hombres y sin conciencia.

Mientras que para mí, al contrario, el hombre forma parte de esta corriente de irreversibilidad que es uno de los elementos esenciales, constitutivos, del universo.

Por tanto, aunque la polémica entre Bergson y Einstein está hoy superada, el debate prosigue no obstante en otros planos. Vuelve la cuestión: ¿el tiempo es, tal como pensaba Bergson, esencial y, en cuanto tal, nunca científico? ¿O bien es accesorio, como pensaba Einstein?

Yo estoy convencido de que el tiempo sí es un objeto de la ciencia. Ha de tener su lugar en la estructura de la ciencia moderna, y este lugar, a mi parecer, es fundamental, es el primero. Hay que pensar, pues, el universo como una evolución irreversible; la reversibilidad y la simplicidad clásicas resultan entonces casos particulares.

3. John Archibald Wheeler, físico estadounidense, nacido en 1911 en Jacksonville (Florida); estudió en Copenhague con N. Bohr, a partir de 1938 fue profesor en Princeton y colaboró en los proyectos Manhattan y Matterhorn; actualmente trabaja en la Universidad de Texas (Austin). Wheeler introdujo en la física nuclear los conceptos de matriz de scattering y de estructura colectiva resonante, y conjuntamente con Bohr explicó el mecanismo de la fisión nuclear; en 1953 propuso el concepto de modelo colectivo del nucleo atómico, mientras que con F. C. Werner elaboró las características del modelo de la gota. Para su concepción del tiempo, véase J. A. Wheeler: *Frontiers of Time*, North-Holland, Amsterdam, 1979.

Mucha gente ha visto en sus reflexiones la búsqueda de una concepción rigurosamente laica del tiempo...

«Laico» es una palabra que puede tener muchos significados. Si lo que usted quiere decir es que la concepción clásica, en la cual el tiempo es relegado fuera de la física, es una concepción que atribuye al hombre poderes casi divinos, estoy de acuerdo, porque creo efectivamente que la ciencia está hecha por el hombre, que a su vez es parte de la naturaleza que describe. La idea de una omnisciencia y de un tiempo creado por el hombre presupone que el hombre es diferente de la naturaleza que él mismo describe, concepción que considero no científica. Seamos laicos o religiosos, la ciencia debe unir el hombre al universo. El papel de la ciencia es precisamente el de encontrar estos vínculos, y el tiempo es uno de éstos. El hombre proviene del tiempo; si fuese el hombre quien creara el tiempo, este último sería evidentemente una pantalla entre el hombre y la naturaleza.

Así pues, desde este punto de vista, mi respuesta es que, en efecto, ésta es una concepción laica, y creo que la ciencia tiene que ser laica, sean cuales sean las extrapolaciones que se nos pueda permitir más allá de la ciencia.

En esta concepción del tiempo, el Big Bang no se puede reproducir. ¿Es por tanto la idea de un universo en continua evolución?

Yo creo efectivamente en una evolución continua del universo, y creo que todas las teorías que pretenden describir cuál va a ser el estado del universo dentro de algunos miles de millones de años son prematuras y simplistas. Porque las grandes líneas de la historia del universo están hechas de una dialéctica, si puedo expresarme así, entre la gravitación y la termodinámica, o, si se quiere, entre Einstein y Boltzmann.[4]

A este nivel no disponemos todavía de una buena teoría unitaria de la gravitación y la termodinámica. Es un problema que me interesa mucho, y en el cual estoy trabajando ahora mismo. Estoy convencido de que hay una estrecha relación entre la termodinámica y la gravitación.

En estas condiciones, el futuro del universo no está determinado de ninguna manera, o por lo menos no lo está más que la vida del hombre o la vida de la sociedad. A mi entender, el mensaje que lanza el segundo principio de la termodinámica es que nunca podemos predecir el futuro de

4. Ludwig Boltzmann (1844-1906), físico austriaco; generó contribuciones fundamentales para el desarrollo de la teoría cinética de los gases y fue, prácticamente, el fundador de la termodinámica estadística (propuso la interpretación probabilista del segundo principio de la termodinámica); son también de gran importancia sus reflexiones epistemológicas, que le llevaron a sostener el carácter hipotético del conocimiento científico; fue profesor de física teórica en Munich (1890-1894) y en Leipzig (1900-1902), para ser titular después de la prestigiosa cátedra vienesa de *Naturphilosophie* (ocupada anteriormente por E. Mach), desde 1902 a 1906. Para la discusión de la posición de Boltzmann véase Prigogine-Stengers: *La Nueva Alianza*.

un sistema complejo. El futuro está abierto, y esta apertura se aplica tanto a los sistemas físicos pequeños como al sistema global, el universo en que nos encontramos.

Pero lo que vemos delante de nosotros, esto es, la evolución biológica y la evolución de la sociedad, es ciertamente una historia del tiempo, una historia natural del tiempo. Sabemos en efecto que, junto al tiempo mecánico, la irreversibilidad lleva a tiempos químicos, a tiempos internos, y la diferencia entre una reacción química que podamos alimentar y la vida es que, en el caso de la reacción química, cuando cesamos de alimentarla, este tiempo interno muere.

Por el contrario, con la aparición de la vida, nace un tiempo interno que prosigue durante los miles de millones de años de la vida y se transmite de una generación a otra, de una especie a otra especie, y no sólo se transmite, sino que se hace cada vez más complejo.

Así como hay una historia de las máquinas calculadoras que en un tiempo astronómico dado consiguen realizar cada vez más cálculos, del mismo modo hay una historia biológica del tiempo que corresponde a una estructura de este tiempo cada vez más compleja. Podemos leer esta estructura en el tiempo musical, por ejemplo, y confrontar cinco minutos de Beethoven con cinco minutos del movimiento de la Tierra.

El movimiento de la Tierra prosigue uniformemente durante estos cinco minutos. En cambio, en los cinco minutos de Beethoven hay ace-

leraciones, disminuciones de la velocidad, vueltas hacia atrás, anticipaciones de temas que aparecerán sucesivamente; un tiempo, pues, mucho más independiente del tiempo externo, que no podría ser concebido por otros organismos menos evolucionados.

Leer la historia del universo como historia de un tiempo autónomo, o de una autonomía creciente del tiempo es, en mi opinión, una de las tentaciones interesantes de la ciencia contemporánea.

Hablando de tentaciones, desde el inicio de sus investigaciones usted se ha orientado hacia la investigación de los fenómenos irreversibles, aunque era un período en el que la mayor parte de los científicos consideraba esta rama de la termodinámica bastante estéril. ¿Qué fue lo que le atrajo hacia esta dirección?

Creo que no se puede entender esta elección sin volver a mi pequeña biografía personal. En el fondo, he llegado a las ciencias «exactas», por así decirlo, a partir de las ciencias humanas. Por tanto, la idea del tiempo y, ligada a ésta, la idea de la complejidad, han estado siempre presentes en mis reflexiones. En definitiva, me he orientado hacia la ciencia de la complejidad que es, históricamente, la termodinámica. Sí, desde el punto de vista histórico, la idea era que el gran éxito de la ciencia consistía en des-

componer los sistemas en piezas, en átomos, en moléculas, en partículas elementales, en biomoléculas, en individuos, mientras que la única ciencia que se esforzaba en ver el conjunto, aunque sin conseguir grandes resultados, hay que reconocerlo, era la termodinámica.

Tiene usted razón, la mayor parte de los físicos, de los grandes físicos, a quienes informé de mi proyecto de ocuparme de la termodinámica, se habían opuesto, sosteniendo que era una elección ridícula. Pero curiosamente, tal vez porque soy testarudo de carácter, o porque aquello correspondía a una exigencia profunda que superaba los mismos interrogantes científicos, me empeñé hasta el fondo. Quizá sea por esto que seguí en la investigación de la termodinámica.

¿Y en qué punto estamos hoy?

Pienso que hemos llegado a una encrucijada. ¿Nos encontramos ante un universo mecánico o ante un universo termodinámico? ¿Qué es lo que hay primero, las leyes reversibles de la mecánica, de la mecánica cuántica, de la relatividad? ¿O la dirección del tiempo, como decía Aristóteles, la perspectiva del antes y del después? Los términos de la cuestión han cambiado mucho en el curso de mi carrera científica.

Uno de los nuevos conceptos surgidos de su investigación es el de estructura disipativa,[5] *al que llega en 1967, al término de una fase de trabajo iniciada en 1947. ¿Cuáles han sido las ideas guía, los momentos decisivos de estos veinte años?*

Al observar esta evolución puede sorprender el hecho de que hayan sido necesarios más de veinte años para dar este paso, pero, por otro lado, se trataba de un campo que había sido poco estudiado, que no se presentaba de una manera muy interesante, y en estas condiciones no había direcciones ya trazadas, no había un punto de referencia fijo capaz de indicar el camino.

Cuando empecé, la termodinámica era una termodinámica del equilibrio. Y tuve que seguir un recorrido a caballo entre el equilibrio y lo que estaba alejado del equilibrio. Existía, es verdad, una teoría para los puntos próximos al equilibrio, que era la teoría de Onsager [6] y otros, pero había muy poco sobre lo que se podía hacer lejos del equilibrio, un campo que, por otra parte, queda todavía por explorar.

La novedad a la que fui llegando poco a poco,

5. Para el concepto de estructura disipativa véase I. Prigogine-G. Nicolis: *Self-Organisation in Non-Equilibrium Systems, from Dissipative Structures to Order to Fluctuations*, Wiley, Nueva York, 1977, y Prigogine-Stengers, La Nueva Alianza.

6. Para la teoría de Onsager de los puntos cercanos al equilibrio, basada en las relaciones de «reciprocidad» descubiertas por el propio Lars Onsager en 1931, véase Prigogine-Stengers, *La Nueva Alianza*

y que constituyó para mí una verdadera sorpresa, fue que lejos del equilibrio la materia adquiere nuevas propiedades, típicas de las situaciones de no-equilibrio, situaciones en las que un sistema, lejos de estar aislado, es sometido a fuertes condicionamientos externos (flujos de energía o de sustancias reactivas). Y estas propiedades completamente nuevas son del todo necesarias para comprender el mundo que tenemos alrededor.

La expresión «estructura disipativa» encuadra estas nuevas propiedades: sensibilidad y por tanto movimientos coherentes de gran alcance; posibilidad de estados múltiples y en consecuencia historicidad de las «elecciones» adoptadas por los sistemas. Son propiedades, estudiadas por la física matemática no lineal en este «nuevo estado de la materia», que caracterizan los sistemas sometidos a condiciones de no-equilibrio.

¿Me podría dar un ejemplo?

En condiciones de equilibrio, cada molécula ve sólo lo más próximo que la rodea. Pero cuando nos encontramos ante una estructura de no-equilibrio, como las grandes corrientes hidrodinámicas o los relojes químicos, tiene que haber señales que recorran todo el sistema, tiene que suceder que los elementos de la materia empiecen a ver más allá, y que la materia se vuelva «sensible».

Ahora bien, yo no soy biólogo, pero es evi-

dente que respecto a la vida esto tiene un gran significado. La vida no es solamente química. La vida tiene que haber incorporado todas las otras propiedades físicas, es decir la gravitación, los campos electromagnéticos, la luz, el clima. De alguna manera se requiere una química abierta al mundo externo, y sólo la materia alejada de las condiciones de equilibrio tiene esta flexibilidad. ¿Y por qué esta flexibilidad? Cuando estamos lejos de las condiciones de equilibrio, las ecuaciones no son lineales; hay muchas propiedades posibles, muchos estados posibles, que son las distintas estructuras disipativas accesibles. En cambio, si nos acercamos al equilibrio, la situación es la contraria: todo resulta lineal y no hay más que una sola solución.

He necesitado algún tiempo para llegar a esta concepción, que en aquel momento representaba una novedad absoluta. Ahora, naturalmente, se han añadido muchas otras cosas, los atractores, la sensibilidad a las condiciones iniciales, el azar determinista, pero todo esto ha ido viniendo después.

Si usted me pregunta cuáles son los elementos que me han influido, yo citaría en primer lugar el libro de Schrödinger *What is Life?*,[7] un libro muy interesante, a menudo profético, que intenta comprender la estructura de las biomoléculas.

7. Erwin Schrödinger: *What is Life?*. Cambridge University Press, 1944. Hay versión castellana: *¿Qué es la vida?*. Tusquets Editores, Barcelona, Metatemas 1, 3ª ed., 1988.

Schrödinger hablaba de cristales aperiódicos, y ésta es una visión realmente profética, pero cuando llegaba al orden biológico, decía: «Tiene que haber algo en el mecanismo de la vida que impide que la vida se degrade, debe haber algún fenómeno irreversible»; pero no tenía nada que decir sobre este fenómeno.

A mí me vino la idea de que es la función la que crea la estructura. Tomemos una ciudad: la ciudad vive gracias a que intercambia materias primas o energía con el campo que la circunda. Es la función la que crea la estructura. Pero la función, el flujo de materia y de energía, es evidentemente una situación de no-equilibrio.

El libro de Schrödinger me hizo intuir en 1945 que los fenómenos irreversibles podían ser el origen de la organización biológica, y desde entonces esta idea no me ha abandonado nunca.

Otra obra que me ha influido, aunque pueda sorprender, es el libro de Jacques Monod *El azar y la necesidad.*[8] Yo no estaba nada de acuerdo con Monod, porque él ponía la vida fuera de la materia, como un epifenómeno debido al azar, pero de alguna manera ajeno a las grandes leyes.

Lo que había aprendido de la termodinámica me permitía tener una concepción totalmente dis-

8. Jacques Monod: *Le hasard et la nécessité; essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Éditions du Seuil, París 1970. Hay versión castellana: *El azar y la necesidad (Ensayo sobre la filosofía natural y la biología moderna)*, Tusquets Editores, Barcelona, Metatemas 6, 4ª ed., 1988.

tinta. Según mi punto de vista, la vida expresa mejor que cualquier otro fenómeno físico algunas leyes esenciales de la naturaleza. La vida es el reino de lo no-lineal, la vida es el reino de la autonomía del tiempo, es el reino de la multiplicidad de las estructuras. Y esto no se ve fácilmente en el universo no viviente.

En el universo no viviente hay estructuras, efectivamente, existe lo no-lineal, pero los tiempos de la evolución son mucho más largos. Mientras que la vida se caracteriza por esta inestabilidad que hace que veamos nacer y desaparecer estructuras en tiempos geológicos. Y es por esto que voy aún más lejos y digo: la vida humana, la vida de las sociedades nos permite observar este fenómeno todavía mejor, porque en este caso lo vemos en una escala de tiempo todavía más corta.

En definitiva el libro de Monod, con el que no estaba nada de acuerdo, me permitió tomar más conciencia de la cuestión metafísica que estaba en juego, porque, y ésta es su grandeza, se atrevía a plantear los problemas en toda su generalidad, en su grandeza, que yo definiría como metafísica.

Así, su libro me hizo tomar conciencia de la importancia de las cuestiones en juego; del hecho de que no se trataba de pequeños problemas reservados a la técnica científica, sino de problemas sobre los que han intentado reflexionar todos los que han realizado la historia intelectual del hombre.

Sus estudios sobre termodinámica le han asignado un importante papel en la comunidad científica: en 1977 recibe el Premio Nobel. Pero a finales de los setenta usted escribe La Nueva Alianza. *¿Qué itinerario le ha conducido a escoger nuevos interlocutores?*

La verdad es que yo mismo me siento un ser híbrido, interesado por las dos culturas: las ciencias humanísticas y las letras por un lado, y las ciencias llamadas exactas por el otro. Advertí efectivamente este conflicto entre las dos culturas de un modo muy intenso en el curso de mis estudios y también en las lecturas que hacía. Se ha dicho que la división entre las dos culturas era debida al hecho de que los no científicos no leían a Einstein, y que los que se ocupaban de ciencia carecían de cultura literaria. Pienso que ésta es una manera muy superficial de ver las cosas. En primer lugar, siempre ha habido obras arraigadas firmemente en las dos culturas; tomemos, por ejemplo, el caso de Zola en Francia, muy influido por la revolución industrial, o las fuentes del pensamiento de Lévi-Strauss (me refiero sobre todo a *Tristes trópicos*),[9] o el de Sigmund Freud; hay toda una serie de obras contemporáneas que extraen la propia inspiración de las dos culturas. Existe, sin embargo, una contraposición que pro-

9. Claude Lévi-Strauss: *Tristes Tropiques*, Plon, París, 1955. Hay versión castellana: *Tristes trópicos*, Paidós Ibérica, Barcelona, 1988.

viene del hecho de que el ideal de la ciencia es el ideal de un esquema universal e intemporal, mientras que las ciencias humanas se basan en un esquema histórico ligado al concepto de situaciones nuevas o de estructuras nuevas que se superponen a otras. Por otra parte, la creación literaria está enteramente basada en el tiempo, y en gran parte en el tiempo vivido. En estas condiciones, el dilema de las dos culturas es un dilema importante.

Yo quedé muy impresionado por el hecho de que fenómenos como el arte abstracto hayan nacido de una necesidad de renovar la visión artística. Para renovar esta visión, Kandinsky y Mondrian buscaron la inspiración en la teosofía, es decir en una dimensión anticientífica. En cambio, los que se tomaron en serio la visión científica, Malevic en pintura o Beckett en literatura, describieron por el contrario la soledad del hombre. No se trata, pues, de un falso problema: se ha producido un divorcio entre la situación existencial del hombre, en la cual el tiempo desempeña un papel esencial, y la visión intemporal, vacía, de la física clásica, aun con las integraciones y las novedades aportadas por la mecánica cuántica y la relatividad.

Así, cuando pude realizar progresos en la comprensión del tiempo, en el interior de la ciencia, me convencí de que tenía la posibilidad de superar esta dicotomía de las dos culturas. No atacando a la ciencia como un instrumento positivista, ni atacando el arte o la literatura como si

fuesen artificios carentes de contenido real, sino más bien poniendo en evidencia cómo se ha creado una unidad cultural que proviene del interior de la ciencia, poniendo en evidencia una *nueva ola* crecida en el interior de la ciencia y capaz de superar esta dicotomía clásica.

Esta conciencia me dio energías para intentar escribir algo que diese fe de la nueva situación. En su conjunto, puedo decir que este esfuerzo ha sido bien acogido; permítame decirle, a propósito, que mi libro ha sido traducido, o lo está siendo, a dieciséis lenguas. Naturalmente que también hay polémicas. Pero sean cuales sean estas polémicas, creo que mi libro expresa una corriente de síntesis muy arraigada en nuestro tiempo.

Usted ha venido a Milán para recordar el Premio Nobel de Giulio Natta. También Natta, en el trabajo que le ha llevado a la invención del polipropileno, ha reflexionado sobre los procesos que permiten llegar a estructuras con un elevado grado de orden y sobre las propiedades que de ellas se derivan. ¿Ha habido algún contacto conceptual entre sus dos líneas de investigación?

He coincidido personalmente con Natta más veces. No soy especialista en polímeros, pero hay un problema fundamental que nos acerca. Para explicarme mejor me referiré a un seminario desarrollado recientemente en Bruselas que giraba alrededor de esta pregunta: «¿Qué

diferencias hay entre la química orgánica y la química biológica?».

La diferencia es que en la química biológica, moléculas como las del DNA son moléculas que tienen una historia y que, con su estructura, nos hablan del pasado en el que se han constituido. Son fósiles, o, si se prefiere, testigos del pasado, mientras que una molécula orgánica creada hoy es un testigo del presente y no ha tenido una evolución histórica.

Yo diría entonces que aquello que acerca el trabajo de mi grupo a las investigaciones de Natta, es el hecho de ir en una dirección parecida a la que él había escogido y que tanto éxito le ha dado: comprender cómo la irreversibilidad del ambiente queda fijada en el orden molecular de un polímero. En los últimos tiempos hemos llevado a cabo experimentos, esencialmente numéricos por el momento, en los que hemos mostrado que a partir de reacciones de cierto tipo, a saber, de no-equilibrio, caóticas, se pueden transcribir, se pueden formar cadenas con una estructura ordenada y una simetría rota, un poco como el DNA que requiere ser leído de cierto modo, como un texto de izquierda a derecha. Y esta nueva ruptura de la simetría, en el espacio, es una consecuencia de la ruptura de la simetría temporal, de la diferencia entre pasado y futuro. Así pues, podría decirse, en cierta medida, que a las preocupaciones estructurales de Natta he querido superponer las mías o las de mi grupo, que son preocupaciones temporales.

Cuando miramos un cristal de nieve, observando su estructura, podemos adivinar en qué condiciones atmosféricas se ha formado: si era una atmósfera fría o más o menos saturada, etcétera. Algún día, observando una molécula de la vida, un DNA o un polímero, podremos comprender en qué circunstancias geológicas o biológicas se ha formado.

Y así volvemos a lo que ha sido el objeto de toda nuestra conversación, el problema del tiempo. ¿Cómo se imprime el tiempo en la materia? En definitiva esto es la vida, es el tiempo que se inscribe en la materia, y esto vale no sólo para la vida, sino también para la obra de arte. Tomemos el ejemplo de la escultura, de las obras más antiguas que conocemos, los dibujos que el hombre de Neanderthal excavaba en la piedra, como los que hay aquí en Italia, en los Alpes. ¿Qué significan estos dibujos?

No tenemos ni idea, pero sin embargo me parece que la obra de arte es la inscripción de nuestra simetría rota (una asimetría muy acentuada, porque nosotros vivimos muy intensamente en el tiempo) en la materia, en la piedra.

Milán, 27 de octubre de 1984

El nacimiento del tiempo

El siguiente texto es una transcripción de la conferencia dada por Ilya Prigogine en Roma el 12 de febrero de 1987, en el ámbito del *Progetto cultura* de Montedison.

El tema de mi disertación concierne a una pregunta clásica: el tiempo, ¿tiene un «inicio»? Sabemos que Aristóteles, al final de un análisis sobre el instante, concluía con la tesis de que el tiempo es «eterno», y que en realidad no se puede hablar de que tuviera un «inicio». Otras concepciones, por ejemplo las de la tradición bíblica, han llevado a ciertos filósofos a la idea de que el tiempo ha sido creado en cierto momento, como las otras criaturas; tal fue, por ejemplo, la opinión de Moisés Maimónides. Pensadores como Giordano Bruno y Einstein creían, por su parte, en un tiempo eterno. Lo que querría mostrarles ahora es que hoy en día esta *quaestio disputata* puede ser retomada en una nueva perspectiva.

No es mi intención, por supuesto, proponer soluciones definitivas para un problema al que se enfrentarán muchas otras generaciones. Pero lo que sí está claro es que en el contexto de la ciencia clásica esta cuestión no podía tener sentido. El universo aparecía entonces como un autómata que no poseía, en realidad, ninguna «his-

toria»: una vez puesto en «funcionamiento», el autómata «prosigue» hasta el infinito su trayectoria. Sabemos también que a partir del siglo XIX la idea de la evolución ha entrado con fuerza en la ciencia, gracias sobre todo a la biología darwiniana. La cuestión estaba ya establecida con toda claridad: basta apelar al ejemplo de Charles S. Peirce, que muy justamente preguntaba cómo un reino viviente evolutivo podía ser concebible en el mundo estático y determinista que describía la ciencia oficial.

¿Cuáles son las exigencias que la física ha de satisfacer frente a un universo evolutivo? Veremos que hoy podemos enumerar tres exigencias: la *irreversibilidad*, la aparición de la *probabilidad* y la *coherencia*, que constituyen las condiciones para la existencia de las nuevas estructuras que ha descubierto la física de los procesos alejados del equilibrio.

Afrontaremos estas exigencias considerando en primer lugar la escala de los fenómenos que nos rodean, la escala llamada macroscópica, la que describe la física de la materia condensada. No daré aquí más que un breve repaso, puesto que ya tuve ocasión de hablar de ello en una conferencia que di bajo los auspicios de la Montedison, *El papel creativo del tiempo*.*

A continuación veremos cuál es el precio que la física fundamental tiene que estar dispuesta a

* Véase más adelante, El papel creativo del tiempo, págs. 81-98

pagar en el caso de que pueda sostenerse que el tiempo desempeñe tal papel. ¿Cuáles son las implicaciones a la escala de los mecanismos microscópicos, desde el punto de vista de la dinámica? Si el mundo estuviese sometido irremediablemente a un conjunto de leyes *a la* Kepler, no encontraríamos más que evoluciones del tipo de las que nos muestran las trayectorias planetarias, y no habría ninguna dirección privilegiada del tiempo. Pero el mundo, según empezamos a sospechar, no es un conjunto de péndulos, no está hecho de movimientos periódicos simples. ¿Cuál es entonces el tipo de sistema dinámico que puede conducir a la irreversibilidad? Este es el punto que discutiremos, sobre todo en el contexto de la mecánica clásica.

En la tercera parte, que presentará algunos resultados recientes, afrontaremos la escala cosmológica. Es conveniente subrayar que la irreversibilidad es una propiedad común a todo el universo: todos envejecemos en la misma dirección. Cierto que se puede concebir que tal amigo mío rejuvenezca mientras yo envejezco, o que yo esté rejuveneciendo mientras él envejece. Pero esto no se encuentra en ninguna parte: parece existir una flecha del tiempo común a todo el universo, y por esta razón no podremos evitar el hablar de cosmología.

Finalmente nos preguntaremos: ¿cómo ha aparecido el tiempo en el universo? ¿En el momento del *Big Bang?* Me gustaría tratar de mostrar cómo en cierto sentido el tiempo *precede* al uni-

verso; es decir que el universo es el resultado de una inestabilidad sucedida a una situación que le ha precedido; en conclusión, el universo sería el resultado de una transición de fase a gran escala.

1
La irreversibilidad a nivel macroscópico

Quisiera decir antes que nada algunas palabras sobre los fenómenos macroscópicos. Todos recordamos el segundo principio de la termodinámica. Dado un sistema, es decir una porción arbitraria del espacio, el segundo principio afirma que existe una función, la entropía, que podemos descomponer en dos partes: un flujo entrópico proveniente del mundo externo, y una producción de entropía propia del sistema considerado.

Es esta producción de entropía interna la que siempre es positiva o nula, y que corresponde a los fenómenos irreversibles. Todas las reacciones químicas son irreversibles; todos los fenómenos biológicos son irreversibles.

Pero, ¿qué es la irreversibilidad? Para muchos hombres de ciencia (y para la mayor parte de los divulgadores) la irreversibilidad corresponde a la disipación, al desorden: cada estructura sería conquistada a través de una fuerte lucha contra el segundo principio; así sería para la vida como para el universo.

Quiero insistir en seguida —y volveré a ello en el contexto cosmológico— sobre el hecho de

que la producción de entropía contiene siempre dos elementos «dialécticos»: un elemento creador de desorden, pero también un elemento creador de orden. Y los dos están siempre ligados.

Esto puede verse con un ejemplo sencillo. En dos cajas comunicantes ponemos una mezcla de dos constituyentes, hidrógeno y nitrógeno; si la temperatura interna del sistema es homogénea, también lo serán la distribución del hidrógeno y la del nitrógeno. Pero si sometemos los extremos del sistema a temperaturas diferentes, creamos una distribución contrastada: el hidrógeno abundará más en una parte y el nitrógeno en la otra.

Por tanto, sometiendo el sistema a una constricción térmica, se crea evidentemente una disipación, un aumento de entropía, pero también un fenómeno de ordenación. Es el conocido fenómeno de la antidifusión (véase fig. 1).

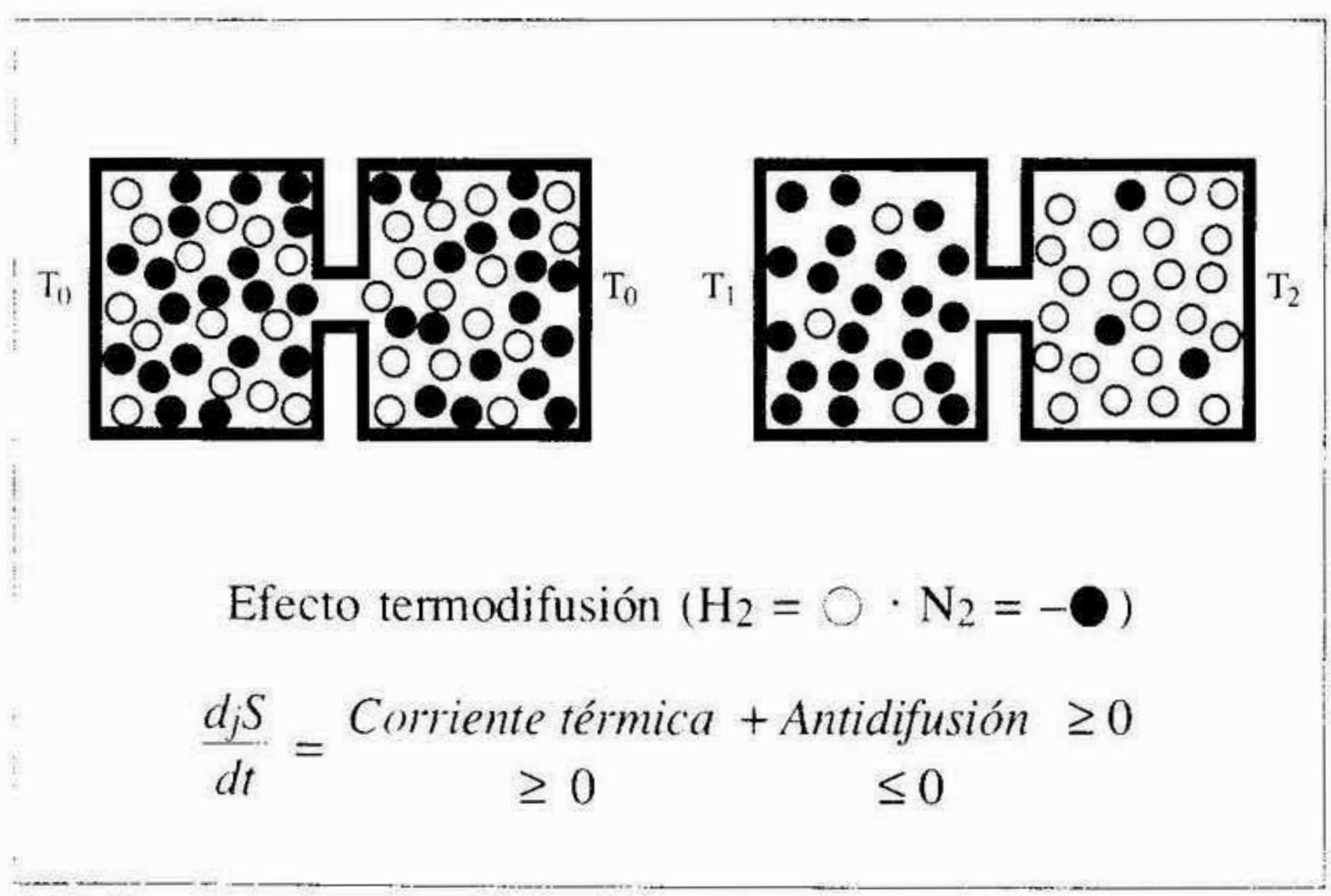


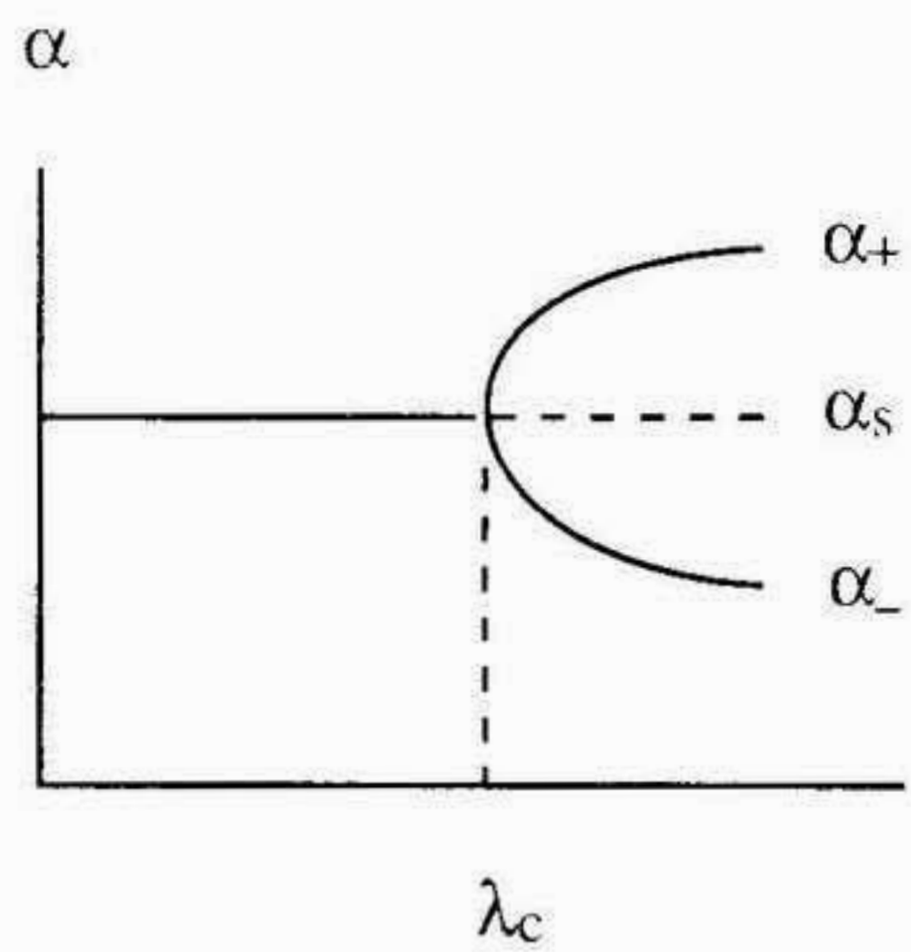
Figura 1

Aquí orden y desorden aparecen a la vez. Este fenómeno requiere un cambio de paradigma, porque clásicamente se asociaba el orden al equilibrio (caso de los cristales) y el desorden al no-equilibrio (caso de la turbulencia). Hoy sabemos que es inexacto: la turbulencia es un fenómeno altamente estructurado, en el cual millones y millones de partículas se insertan en un movimiento extremadamente coherente. Esto vale también para muchos otros fenómenos, como por ejemplo los relojes químicos, que son reacciones oscilantes: podemos ver cómo la solución pasa del rosa al azul, después al rosa, otra vez al azul, y así sucesivamente...

Esto es un fenómeno ordenado, que traduce la instauración de una coherencia entre las moléculas. Hoy día las experiencias de laboratorio (como las experiencias numéricas con los ordenadores) muestran que cuando se afronta el dominio del no-equilibrio, se establecen nuevas interacciones de largo alcance: el universo del no-equilibrio es un universo coherente. Y esto representa un hecho nuevo, que contradice todo lo que se pensaba hasta hace muy pocos años.

El ejemplo clásico es, aquí, el de la inestabilidad de Bénard. Si calentamos por debajo un estrato de líquido, podemos observar la formación de vórtices, fenómenos coherentes que transmiten el calor de manera más eficaz que la sola conducción térmica. Es un ejemplo de bifurcación que conduce a la aparición de nuevas estructuras, las estructuras del no-equilibrio, que

hoy se ha convenido en llamar *estructuras disipativas*. El no-equilibrio constituye el dominio por excelencia de la multiplicidad de soluciones (véase fig. 2).



Bifurcación: Concentración de una especie química en función de un parámetro λ.
Para los valores de λ inferiores al umbral λ_c, existe una sola solución α_s.
Por encima de este umbral, esta solución se vuelve inestable y aparecen nuevas soluciones.

Figura 2

La figura 2 muestra las variaciones de la concentración de un componente de una reacción química en función de su separación del equilibrio. ¿Cuál es el mecanismo de aparición de estas nuevas estructuras? Volveremos a ello en el contexto de la cosmología: es siempre un mecanismo de amplificación de las fluctuaciones. En una reacción química, sabemos que se producen fluctuaciones sin cesar. Hay siempre, aquí o allá, un

poco más o un poco menos de un compuesto dado de lo que sería su concentración media. Sin duda, para un estado próximo al equilibrio, este hecho es insignificante: las fluctuaciones mueren, y el ambiente vuelve a un estado homogéneo. Pero en una situación alejada del equilibrio puede producirse lo contrario: en vez de comprobar un retorno al estado inicial, vemos una amplificación de las fluctuaciones, y esta amplificación lleva a una situación nueva, que da lugar a una serie de posibilidades variadas que hoy día la física sólo ha empezado a explorar. No hay un campo más «explosivo», hoy, que el del estudio de los fenómenos de no-equilibrio.

¿Por qué este interés por el no-equilibrio? ¿Por qué tal interés por estas nuevas estructuras? Porque hoy sabemos que muchos de los fenómenos interesantes observados en laboratorio y que tienen un papel fundamental en el mundo que nos rodea, no son comprensibles si no es teniendo en cuenta el no-equilibrio.

Un ejemplo que impacta es la historia del clima, con sus numerosos períodos de glaciación desde el inicio del cuaternario. De esta manera es cómo podemos hablar de una *historia* del clima. Investigaciones recientes han podido demostrar que esta sola expresión ya implica que la biosfera es un sistema alejado del equilibrio. Un sistema en equilibrio no tiene y no puede haber tenido historia: no puede más que persistir en su estado, en el cual las fluctuaciones son nulas.

2
La irreversibilidad microscópica

Pero, ¿cómo es posible que los fenómenos irreversibles tengan tal papel en la naturaleza? Si pensamos en el péndulo, no logramos ver cómo pueden aparecer la irreversibilidad o las probabilidades. En el ejemplo de la bifurcación que he indicado antes, hay dos posibilidades, dos estados posibles después de la bifurcación. Irreversibilidad y probabilidad son dos nociones estrechamente ligadas, como sabemos después de Boltzmann. Sabemos también que en la mecánica cuántica la noción de probabilidad es esencial, pero aquí vemos imponerse esta noción a nivel macroscópico.

Quisiera analizar un poco más de cerca el papel de la probabilidad con un ejemplo trivial. Tiro repetidamente una moneda y compruebo que aproximadamente la mitad de las veces sale cara y la otra mitad, cruz. Cada uno de estos sucesos tiene la misma probabilidad. ¿Cuál es la ley fundamental de la naturaleza? ¿Es una ley determinista? En cualquier caso, las leyes de la mecánica clásica deberían poder aplicarse a esta moneda: es un cuerpo pesante, y no un átomo. Pero com-

probamos también que el resultado es probabilístico, y no determinista.

¿Cómo conciliar probabilidad y determinismo en el caso de la moneda? Podría depender de la precisión con la que preparo las condiciones iniciales. Si puedo efectivamente imponer condiciones iniciales suficientemente exactas para predecir el resultado del juego, puedo concluir que el resultado es determinista, y que el recurso a la probabilidad tendría su origen en mi ignorancia relativa a las condiciones iniciales.

Esta es la imagen que tiene la mayoría de la gente sobre la probabilidad. Me sorprendo por encontrarme con un amigo en Roma, quedo sorprendido porque no le he telefoneado antes de partir; si le hubiese llamado, habría sabido de su viaje a Roma y estaría menos sorprendido por encontrármelo. Pero, como no le he telefoneado, experimento un sentimiento de sorpresa. Pero, ¿es acaso la ignorancia la única fuente de sorpresa? NO: existen sistemas dinámicos tales que ningún conocimiento finito de las condiciones iniciales permite prever el resultado del juego.

Para esta clase de sistemas dinámicos, basta que cambie infinitesimalmente mis condiciones iniciales para que se produzca otro suceso.

Cualquiera que sea la precisión finita de mis condiciones iniciales, nunca puedo determinar un punto sobre la figura 3; en otras palabras, la situación dinámica es de tal manera inestable que cada solución (+) está rodeada de so-

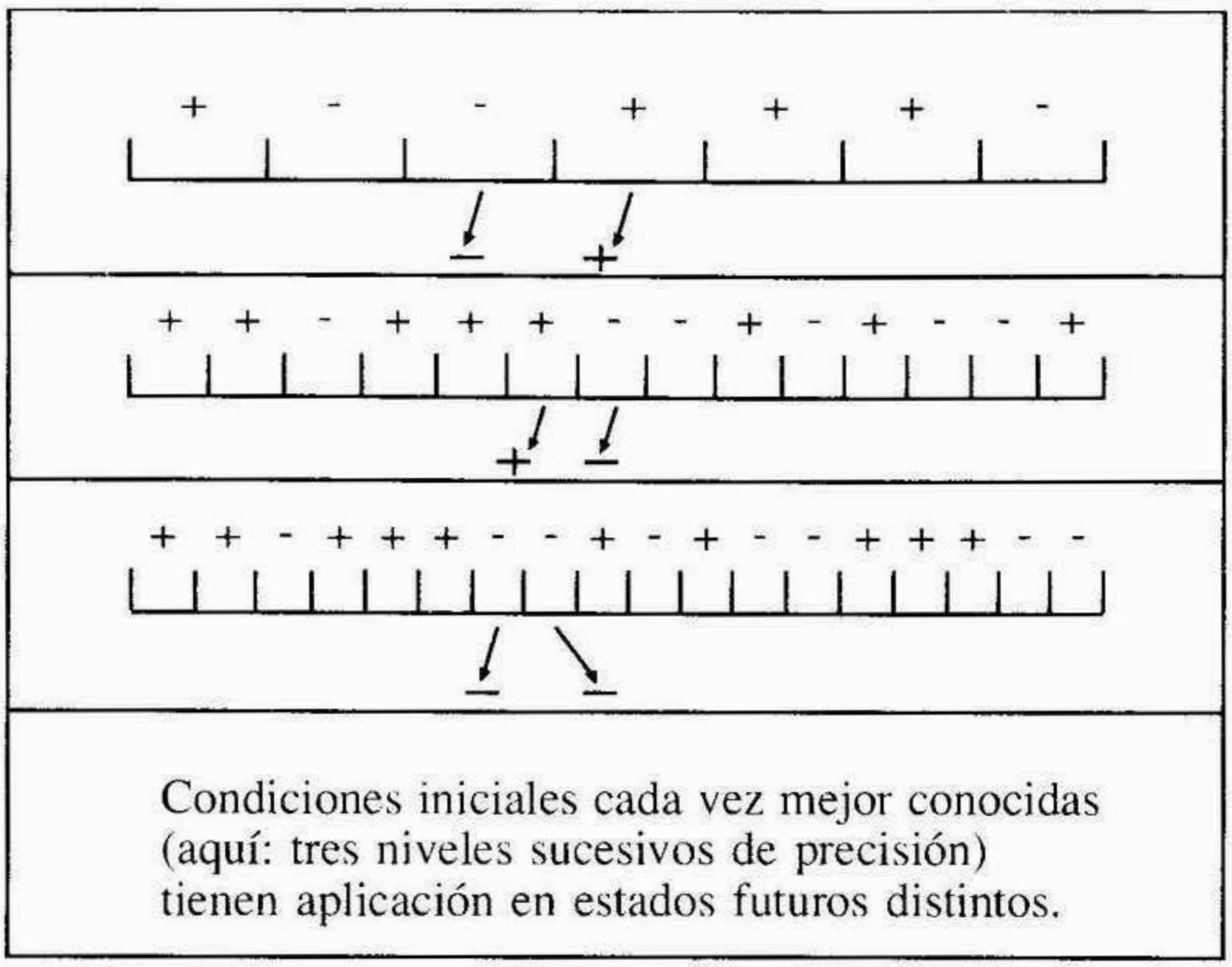


Figura 3

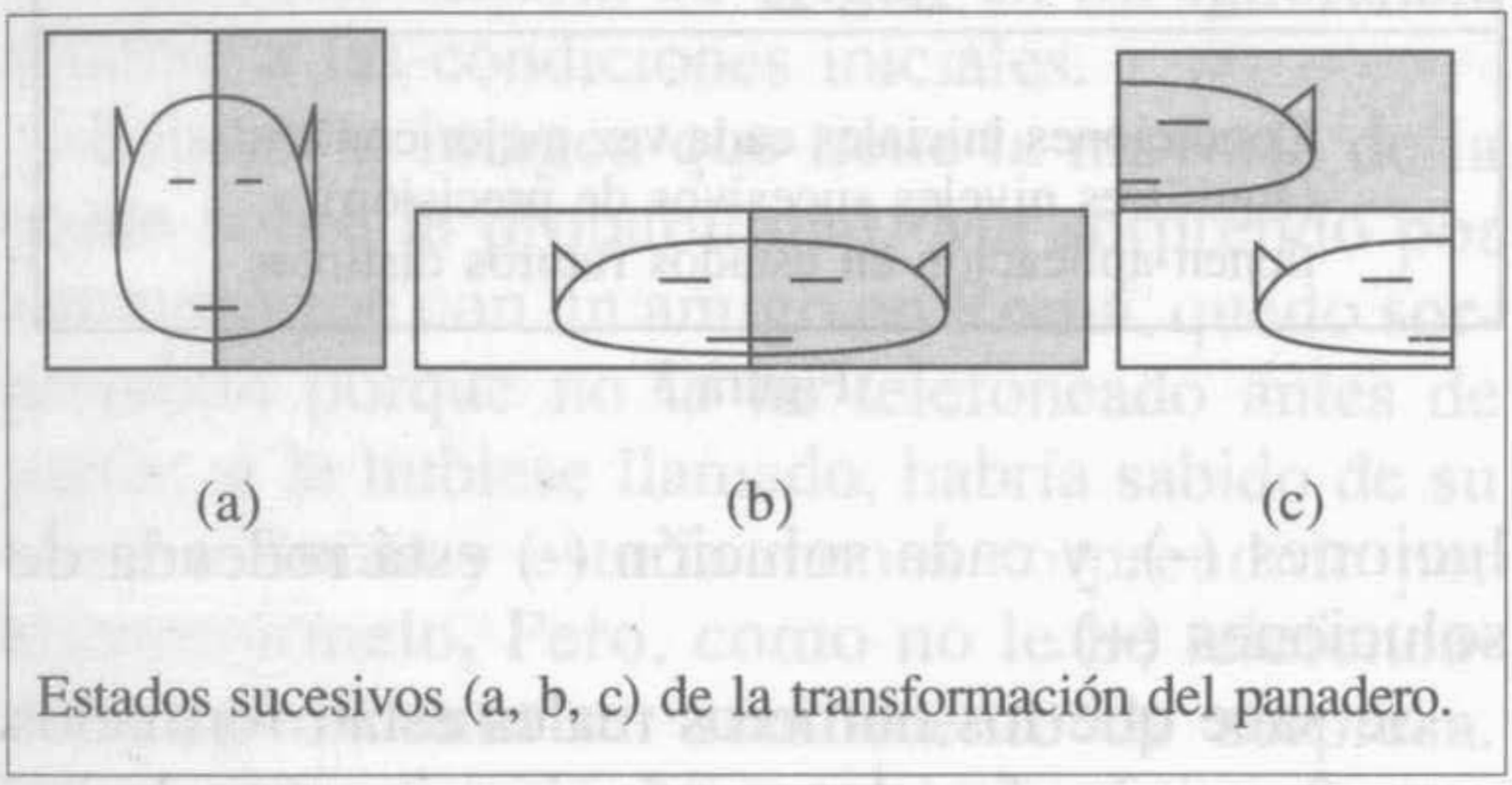
luciones (-), y cada solución (-) está rodeada de soluciones (+).

Se sabe que los números reales están formados por números racionales y números irracionales, y también se sabe que cada número racional está «rodeado« por números irracionales y que cada número irracional está «rodeado» por números racionales. ¿Cómo decidir que un punto dado corresponde a un número racional o a un número irracional, aunque pueda disponer de una precisión arbitrariamente grande? No lo podremos decidir nunca.

Veremos cómo en la predicción del comportamiento de los sistemas inestables no es la insuficiencia de nuestro conocimiento la que está en juego, sino la naturaleza dinámica del sistema. Es la inestabilidad dinámica la que estará en el

origen de las nociones de probabilidad y de irreversibilidad.

He recordado ya que probabilidad e irreversibilidad son conceptos estrechamente ligados. Es fácil ilustrar el concepto de sistema inestable con el ejemplo de la denominada transformación del panadero: éste, como todo el mundo sabe, toma un trozo de pasta, lo extiende y dobla una mitad sobre la otra (fig. 4).



Estados sucesivos (a, b, c) de la transformación del panadero.

Figura 4

La transformación del panadero aplica un área inicial dada, *A*, sobre «dos áreas», y después sobre «un gran número» de áreas. *Cualquiera* que sea la proximidad de los puntos o áreas de partida, después de algunas iteraciones de la transformación que hemos descrito, pueden encontrarse muy separados: así sucede también con los sistemas fuertemente inestables.

Ahora es posible mostrar otro aspecto de la inestabilidad de los sistemas dinámicos mediante

una representación de esta transformación. Si transcribimos en desarrollo binario los números correspondientes a las coordenadas de un punto dado en el espacio del sistema, podemos obtener una formulación muy simple de la transformación del panadero, que consiste en aplicar este punto sobre aquel cuya notación de las coordenadas corresponde a una traslación de una posición hacia la izquierda de los dígitos binarios. Si convenimos en indicar como u_n las cifras del desarrollo binario, y si ordenamos adecuadamente estos dígitos, la formulación conocida como «*Shift* de Bernouilli» hace corresponder el dígito que ocupaba el lugar n en las coordenadas del punto de partida, al dígito del lugar n-1 del punto de llegada:

$$u_n - 3,\ u_n - 2,\ u_n - 1,\ u_n,\ u_n + 1,\ u_n + 2\ \ldots$$
$$u_n - 2,\ u_n - 1,\ u_n,\ u_n + 1,\ u_n + 2,\ u_n + 3\ \ldots$$

La evolución de semejante sistema es impredecible desde el punto de vista dinámico. Consideremos el dígito u+2; en la próxima iteración entra un dígito u+3 que no se conocía. Por tanto, el punto que este *dígito* contribuía a medir no es ya una condición inicial conocida adecuadamente: da lugar, en efecto, a dos puntos «posibles». En la etapa sucesiva, cada uno de estos dos puntos exige de nuevo una opción entre dos puntos «posibles».

Podemos mostrar que para predecir sobre tiempos cada vez más largos (linealmente) la evolu-

ción de este tipo de sistema, hay que disponer de una precisión cada vez más fina (en sentido exponencial) en el conocimiento de las condiciones iniciales. Cualquier conocimiento finito de este sistema implica la pérdida del concepto de predicción determinista. Ahora bien, cualquiera que sea nuestra información sobre el sistema, tal información no nos puede ser dada más que a través de una ventana finita. Y por tanto, finalmente, la descripción dinámica clásica, ligada al concepto de trayectoria (puesto que una trayectoria es el paso de un punto a otro), se ha perdido definitivamente.

Los datos de los que un ser finito dispone sobre la naturaleza corresponden obligatoriamente a una información finita. Yo no dispongo mas que de una *ventana* sobre la naturaleza. Todos han leído la novela de Umberto Eco, *El nombre de la rosa*, uno de cuyos protagonistas es Guillermo de Baskerville. Escoger el nombre de Baskerville significa evidentemente evocar un famoso relato de Conan Doyle, y por consiguiente el arte de la conjetura del maestro de la novela policiaca. Hasta no hace mucho tiempo, los físicos pensaban que no formulaban nunca conjeturas. Sin duda, para defender a un acusado el abogado ha de resolver cuestiones parecidas a acertijos, pero el físico «debería poder conocer» el universo de una manera absoluta. Ahora bien, por poco que se examine un sistema dinámico sencillo como el de la transformación del panadero, esto ya no resulta ser verdad: el determinismo es derrotado

inmediatamente. Tengo que substituir en cada momento mi información sobre un «punto» por una información sobre un «sistema de puntos», ya que el conocimiento de que dispongo sobre las condiciones iniciales, *cualquiera que éste sea,* no me permitirá seguir la *trayectoria* en el curso del tiempo.

Las ideas que acabo de exponer tienen cada día más eco. Tomaré sólo un reciente texto de Lighthill como ejemplo: *The Recently Recognized Failure of Predictability in Newtonian Dynamics.* Este texto testimonia perfectamente la reciente revolución de las ideas en mecánica clásica: «Tengo que hablar a favor de la amplia confraternidad entre los profesionales de la mecánica. Querríamos pedir excusas colectivamente por haber engañado al público difundiendo ideas sobre el determinismo de los sistemas basados en las leyes de Newton sobre el movimiento que, desde 1960, se han demostrado inexactas».

En la física clásica se podía medir todo, y conocerlo todo; uno de los elementos nuevos, revolucionarios, de la física del siglo XX, es la restricción de esta visión demasiado simplista del universo.

Tal situación es un ejemplo muy interesante del peligro de las extrapolaciones. Según la opinión de muchos científicos, la dinámica clásica había alcanzado su forma definitiva y el determinismo aparecía como la misma condición de inteligibilidad. Hoy vemos que no es así. Los nuevos datos constituyen sin duda el núcleo de

la revolución conceptual que atravesamos desde el comienzos del siglo XX.

Volvamos al problema del determinismo. Hemos hablado ya del papel de la inestabilidad dinámica; nos queda por hablar de las constantes universales. Como ustedes saben, la teoría de la relatividad restringida se basa en la hipótesis de una velocidad límite de propagación de las señales, que es la velocidad de la luz en el vacío y que es medida por la constante *c*. La existencia de este límite es un nuevo argumento sobre la limitación del esquema determinista.

En este mismo momento en que les estoy hablando, podría partir de Australia un rayo láser que destruiría Roma al instante. Esto es muy poco probable, afortunadamente, pero yo no tengo ningún medio para predecirlo, es decir, para enviar una señal *más rápida* y así saber lo que está sucediendo. En relatividad, yo no controlo más que mi propio pasado y el de todos aquellos que están en mi «cono del pasado». La existencia de la velocidad maximal de propagación de la luz implica una ruptura con el determinismo. Poincaré, el gran matemático y físico francés, estaba hasta tal punto impresionado por esta conclusión que anunciaba que se debería volver a Newton, a un espacio absoluto, a un espacio que Newton llamaba la casa de Dios, *Domus Dei;* pero, añadía Poincaré, esto no serviría de nada, porque sobre Dios la física no sabe decir nada.

El ejemplo de la mecánica cuántica es también muy instructivo. Las relaciones de indetermina-

ción se exponen en todas las obras que presentan la historia de la ciencia del siglo XX. En este caso no es c la que desempeña un papel esencial, sino la constante de Plank, h.

Un ejemplo de relación de indeterminación es:

$$\Delta p \, \Delta q \gtrsim \hbar \, ;$$

esta relación remite al carácter no conmutativo de los operadores correspondientes a p, la cantidad de movimiento, y a la coordenada q.

¿Ha llegado a su término la limitación progresiva de nuestras medidas? No lo creo. En algunos trabajos recientes, algunos colegas míos y yo mismo hemos intentado modificar la mecánica cuántica para que tenga en cuenta la inestabilidad de los estados cuánticos excitados. No puedo entrar aquí en los detalles de esta teoría. Pero quisiera recordar que a un estado cuántico inestable corresponde la relación de indeterminación:

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\tau}$$

donde τ es la vida media del estado inestable, y ΔE la indeterminación sobre la energía del estado cuántico considerado. En una situación experimental dada, la vida media está bien determinada. De ello resulta que esta última relación de incertidumbre limita la medida del valor de una variable de energía, y ya no de una pareja de variables. Si nos tomamos en serio esta rela-

ción, la mecánica cuántica tiene que transformarse para ser más probabilista todavía de cuanto lo sea hoy.

En la concepción clásica el determinismo era fundamental, y la probabilidad era una aproximación a la descripción determinista, debida a nuestra información imperfecta. Hoy la situación es la inversa: las estructuras de la naturaleza nos constriñen a introducir la probabilidad *independientemente* de la información que poseamos. La descripción determinista no se aplica de hecho más que a situaciones sencillas, idealizadas, que no son representativas de la realidad física que nos rodea.

3
La irreversibilidad en cosmología

Durante esta exposición, he subrayado el papel de la probabilidad y de la irreversibilidad: primero a nivel macroscópico, después a nivel microscópico.

Podemos ver actualmente cómo la irreversibilidad limita el alcance de la noción de trayectoria clásica, en razón de la inestabilidad que encontramos en los sistemas dinámicos, y también la noción de función de onda en la mecánica cuántica, cuando hay que tener en cuenta la vida media de los estados cuánticos.

Pero hay un tercer dominio, el dominio cosmológico. Ya lo he dicho: la irreversibilidad es algo común al universo entero, no es relativa sólo a una parte del universo. Se presenta por tanto el problema: cómo concebir el inicio del tiempo, la creación del tiempo y la creación del universo. Tal vez hayan encontrado ustedes una idea que aparece a menudo en la prensa científica: el universo sería un *free-lunch* (restaurante donde se sirve la comida gratuitamente). ¿Qué se pretende con esta expresión? Se quiere decir que tal vez es concebible crear un

universo a partir del vacío, sin ningún dispendio de energía.

Dada la célebre relación de Einstein $E=mc^2$, corresponde a las masas una energía positiva. Por el contrario, y volveremos sobre este punto, puede parecer natural asociar a la gravitación una energía negativa, aunque se trate de un problema más complejo de lo que parece a primera vista. Si se acepta esta dualidad de energías positiva y negativa, se puede concebir un universo con energía total nula: la energía de la materia compensa la de la gravitación, y la energía total permanece constante, como se verifica por otro lado en el caso del vacío *absoluto*, en el que no hay ni gravitación ni materia.

He aquí la idea del *free-lunch:* el universo podría formarse sin gasto de energía. Para los termodinámicos, esto no resulta nada sorprendente. ¿Para qué debería servir un dispendio energético? También los vórtices de Bénard son un *free-lunch*. Evidentemente, para que se cree el vórtice, es necesario el calor; y es la energía de calentamiento la que se transforma en estos bellos vórtices que todos hemos podido admirar.

Pero, ¿cuál es el precio que debe pagarse para que se creen los vórtices? No es la energía, sino más bien la entropía: los vórtices se forman gracias a los procesos irreversibles. De aquí la idea de que el precio del universo sea también un precio *entrópico*, una enorme producción de entropía en los orígenes del universo, contrariamente a la idea clásica según la cual el universo co-

menzaría con una entropía despreciable, que aumenta hasta la muerte térmica, estado en el que la entropía sería maximal.

Así pues, la idea a la que he llegado es que la muerte térmica está *detrás de nosotros;* la muerte térmica está de hecho en los inicios del universo. Todos los otros fenómenos entrópicos debidos a la fusión de los núcleos, a la vida y a la historia, son en realidad absolutamente despreciables en comparación con la enorme producción de entropía que tuvo lugar en el inicio del universo.

Lo que nos anima en la idea de una formación del universo asociada a una explosión entrópica es que hoy en día sabemos que el universo posee una estructura doble; está formado por dos tipos de constituyentes: los fotones y las otras partículas, los bariones.

El hecho curioso, descubierto en 1965, es que el universo está formado sobre todo de fotones, puesto que existen 109 fotones por un barión. Por lo tanto, el universo es antes que nada un universo de fotones en el cual navegan los bariones. Ahora bien, los fotones son productos de «desecho». Los fotones se van enfriando, sencillamente, con la dilatación del universo. En cambio, los bariones son objetos de no-equilibrio, son los supervivientes de los primeros momentos del universo; eran ellos los que contenían potencialmente las galaxias, los planetas, la vida.

La entropía total del universo procede del predominio de los fotones. Se ha estimado que si toda la materia de nuestro universo se descom-

pusiera en fotones, la entropía del universo no cambiaría más que en una fracción porcentual. Al comenzar mi conferencia, he recordado que la creación de entropía va acompañada de una creación simultánea de orden y de desorden. En este caso, vemos que el desorden puede ser asociado a los fotones, mientras que los portadores de orden son los bariones.

Tal vez podemos esbozar una analogía con la biología. ¿Acaso no ha dicho François Jacob que el sueño de toda molécula es el de reproducirse? ¿No sería entonces el sueño de todas las partículas elementales el de durar? El sueño de reproducirse implica biomoléculas como el DNA. El sueño de durar, ¿no podría entonces implicar la introducción de una complejidad intrínseca, que ahora deberíamos reconocer a las partículas llamadas «elementales»?

¿Cómo conciliar esta termodinámica cosmológica con las ideas de Einstein y de la cosmología moderna? La ecuación fundamental de Einstein relaciona la curvatura del espacio-tiempo a la presión y a la densidad o, para expresarlo de manera más precisa, al tensor de energía-impulso de la materia.

El carácter único de la relatividad general es el de haber superado la dualidad inherente a las concepciones newtonianas, que se basaban por una parte en el espacio-tiempo considerado como un recipiente pasivo, y por la otra en la materia.

La historia de la cosmología del siglo XX es impresionante. Einstein fue el primero en utilizar sus ecuaciones fundamentales para salir de un

modelo estático del universo, correspondiente al concepto clásico de eternidad. Como es bien sabido, alrededor de 1922 se tuvo que abandonar la idea de un universo estático a favor de un universo en expansión. Pero pocos se tomaban entonces en serio esta teoría que atribuía el origen del universo a una singularidad, el célebre *Big Bang*, que habría ocurrido entre diez y veinte mil millones de años antes. Se podía afirmar todavía que tal expansión era solamente una similitud geométrica. Pero después de 1965, fue inevitable asumir seriamente la idea de una evolución cosmológica, porque fueron descubiertos los fotones de la radiación de fondo, producidos en un momento muy temprano en la historia del universo. Y es así como el mundo científico ha aceptado casi unánimemente la idea de un *Big Bang*, de una singularidad inicial.

Pero es una idea difícil de aceptar. ¿Qué significa un «inicio del tiempo»? Sea lo que sea, hacia 1970 los investigadores parecían haber llegado a una imagen satisfactoria de la evolución del universo. Es probable, por otro lado, que pocas cosas cambien en este modelo (que actualmente se denomina modelo *standard*) por lo que respecta a la evolución del universo después del primer segundo. En cierto sentido es una conquista notable, teniendo en cuenta el hecho de que la edad total del universo es del orden de unos 10^{17} segundos.

El esfuerzo actual se concentra sobre este segundo crucial. Es aquí donde el modelo standard

no nos da más que informaciones muy escasas. Las ecuaciones de Einstein, que están en la base del modelo, prevén una expansión adiabática con conservación de la entropía, y tales ecuaciones no incluyen ningún fenómeno irreversible. Si prescindimos del *Big Bang*, obtenemos condiciones iniciales en las cuales toda la masa y toda la entropía del universo están ya presentes. Este universo se encontraba entonces en condiciones de temperatura extremadamente elevadas, del orden de la temperatura de Plank, o sea 10^{32} grados Kelvin. ¿Qué significan semejantes condiciones iniciales? De hecho, el modelo standard evitaba plantear esta cuestión, y hoy el esfuerzo de muchos teóricos se concentra exactamente sobre el problema de los inicios del universo, de la génesis de las cosas: una de las cuestiones más fascinantes de la física teórica.

Conviene recordar que antes del descubrimiento de los fotones ligados a la radiación de fondo de cuerpo negro Hoyle y otros habían desarrollado la teoría del *universo estacionario,* en el cual hay creación permanente de materia; esta materia abandonaría el «horizonte observable», llegando así a un estado estacionario en el que ninguna de las propiedades intensivas de nuestro universo (presión, densidad) cambiaría. La ventaja de este modelo es que evita la idea de la singularidad inicial, asociada al *Big Bang*. Pero la teoría del universo estacionario no puede satisfacernos porque no puede explicarnos los aspectos evolutivos que presenta nuestro universo.

Nos encontramos por tanto en una situación difícil: no parece haber otra opción entre un *Big Bang* bastante misterioso y una teoría inaceptable del universo estacionario.

La teoría que voy a exponerles intenta evitar el dilema. Hace comenzar el universo de una inestabilidad, concepto muy distinto al de singularidad. En el caso de una inestabilidad, la aparición del universo se puede comparar a un cambio de fase. El universo, como nosotros lo vemos, es entonces el resultado de una transformación irreversible, y proviene de «otro» estado físico.

Quisiera en primer lugar explicar de qué inestabilidad se trata. Sigo aquí los trabajos de Brout, Englert y Gunzig. Ellos parten de la idea de un acoplamiento entre un campo de gravitación y un campo de materia. Las ecuaciones no-lineales que corresponden a este acoplamiento admiten diferentes tipos de soluciones.

Una solución trivial es el vacío: ni materia ni gravitación. Pero el análisis de esta solución muestra que es inestable con respecto a la producción de partículas de masa suficientemente grande. Podemos representar este vacío como un vacío fluctuante, que produce masas ligeras o pesadas. Cuando la masa producida alcanza un valor del orden de cincuenta veces la *masa de Plank*, el vacío se vuelve inestable y se transforma en un sistema materia-gravitación, es decir, en un universo. La masa de Plank puede expresarse en función de tres constantes universales: la veloci-

dad de la luz c, la constante de Plank h, y la constante gravitacional k.

La masa de Plank tiene un valor de 10^{-5}, y cincuenta veces esta masa es aproximadamente 10^{-3} g, una masa que casi podemos tomar y pesar. Una partícula elemental con una masa tan «enorme», relativamente hablando, es un agujero negro. Si de hecho se calcula su «radio de Compton», este radio resulta pequeño con respecto al que llamamos el «radio de Schwarzchild», que es el radio por debajo de cual un fotón proveniente del mundo externo es absorbido por el agujero negro. De los agujeros negros conocemos propiedades tales como su temperatura (inversamente proporcional a la masa), o su vida media (proporcional a la masa al cubo).

He presentado recientemente, con J. Géhéniau y E. Gunzig, un bosquejo del nacimiento del universo basado en un modelo de este tipo. En un primer momento, en virtud de la inestabilidad de partículas correspondientes a la masa crítica, vemos constituirse agrupaciones de masa, «pequeños agujeros negros», del orden de 10^{-3} g. Durante esta fase el universo se expansiona de manera exponencial (como en los modelos inflacionarios, muy estudiados hoy en día). Pero estos pequeños agujeros negros son inestables y se descomponen en tiempos del orden de 10^{-35} segundos. A partir de este momento el universo deviene similar al que conocemos, formado por bariones y por fotones.

Hoy existen diferentes modelos del origen de nuestro universo. Cada uno presenta elementos

especulativos, y esto vale también en el caso de lo que voy a decir. Pero creo que estoy en condiciones de afirmar que nuestro modelo es hasta hoy el único capaz de conducir a predicciones.

Permite, en efecto, deducir la relación actual entre el número de fotones y el número de bariones (que mide la entropía total del universo), en buen acuerdo con los datos experimentales, y esto solamente en función de las tres constantes universales h, c, k. Así, las principales propiedades térmicas del universo actual se expresan con la única ayuda de estas constantes.

Esto representa un éxito indudable. Pero, si tengo confianza en este modelo es porque nos propone un modo coherente de conciliar la exigencia de una teoría unificada del universo con su propia evolución.

Es bien sabido que el problema de la unificación de las fuerzas está a la orden del día. La *Grand Unification Theory,* las «cuerdas» y las «supercuerdas» son los instrumentos con los cuales se intenta proceder a la unificación. Pero un universo solamente unificado sería estático, complicado quizá, pero no evolutivo. Necesitamos, por tanto, algo más que una unificación, un grado de libertad evolutiva.

Esto es precisamente lo que propone nuestro modelo. En él la relación entre espacio-tiempo por una parte y materia por la otra, no es simétrica. La transformación del espacio-tiempo en materia en el momento de la inestabilidad del vacío corresponde a una explosión de entropía,

a un fenómeno irreversible. La materia corresponde en realidad a una *contaminación* del espacio-tiempo. Pero, como he subrayado repetidamente, la contaminación, la disipación, son productores a la vez de orden y de desorden.

Alejándome por un momento del cáracter «popular» de esta conferencia, quisiera decir una palabra sobre el grado de libertad evolutiva. Se admite que el universo, según una primera aproximación, es homogéneo e isótropo. Tal universo puede ser descrito por una métrica «conforme a la métrica de Minkowski». Esto significa que su elemento de línea *ds* difiere del de un espacio de Minkowski en un solo grado de libertad:

$$ds^2 = F^2 \, (ds)^2.$$

La gravitación puede ser descrita entonces por un *campo escalar* que podemos introducir en un espacio de Minkowski. La energía de este campo escalar es negativa (de acuerdo con lo que habíamos dicho antes sobre el *free-lunch*). Es este carácter negativo el que permite extraer energía gravitacional para crear materia. Por este camino llegamos a un resultado inesperado: el universo no poseería un estado fundamental estable. De esto se deriva que el estado fundamental (el vacío) puede disminuir su energía emitiendo agujeros negros, de la misma manera en que un átomo puede pasar de un estado excitado a su estado fundamental emitiendo fotones. Este fenómeno es evidentemente irreversible.

En uno de sus relatos, Isaac Asimov describe cómo una sociedad muy avanzada consagra inmensos recursos para la construcción de un ordenador gigante capaz de responder a la «última pregunta»: ¿cómo vencer el segundo principio de la termodinámica? La máquina responde imperturbable: «Datos insuficientes»; de manera que se llegan a agotar todos los recursos mundiales para recoger tales datos. Y, cuando la máquina está al fin preparada para dar una respuesta, aparece otro universo. Es claro que este relato se apoya sobre la falsa idea de que el universo tenga que construirse contra las leyes de la termodinámica. Nosotros vemos en cambio, en la investigación actual, que no es así. Gracias al segundo principio es como se ha desarrollado el universo, y como la materia lleva consigo el signo de la flecha del tiempo.

En este contexto podemos plantear preguntas que, inevitablemente, presentan un carácter especulativo. Por ejemplo, ¿cuál es el futuro de nuestro universo? Según la imagen clásica, en el caso de un universo abierto, tiene que dispersarse, confirmando su propio fin. Aquí, por el contrario, un nuevo nacimiento resulta posible, si las condiciones que han permitido la primera inestabilidad se pueden reproducir. ¿Cuál es la densidad de materia compatible con tal inestabilidad? Este es un cálculo que mis colaboradores y yo estamos intentando efectuar: se trata, probablemente, de un tiempo muy largo, tal vez cien mil millones de años. Podemos también imaginar la historia

del universo como la de una reacción química explosiva que queda bloqueada por sus propios productos de desecho, hasta el momento en que éstos son eliminados, y una nueva explosión vuelve a ser posible.

Vemos, pues, que la inestabilidad, las fluctuaciones y la irreversibilidad desempeñan un papel en todos los niveles de la naturaleza: química, ecológica, climatológica, biológica con la formación de biomoléculas, y finalmente cosmológica.

4
El nacimiento del tiempo

Llegados a este punto, volvemos al título de mi conferencia. ¿Ha habido un «nacimiento del tiempo»? La cuestión es muy compleja. Probablemente ha habido un nacimiento de nuestro tiempo. Probablemente ha habido un nacimiento de nuestro universo. ¿Está aquí el nacimiento del tiempo en sí? Es un hábito, una convención, la que nos lleva a contar el tiempo a partir de un acontecimiento. Ya sea el nacimiento de Cristo o la fundación de Roma, cada vez se trata del nacimiento de *nuestro tiempo*.

No debemos olvidarlo: la ciencia sólo puede describir fenómenos repetibles. Si ha habido un fenómeno único, una singularidad como la del *Big Bang*, nos encontramos ante un elemento que introduce aspectos cercanos a lo trascendental, que escapan a la ciencia.

De la misma manera, yo no creo que la vida corresponda a un fenómeno único: la vida se forma cada vez que las circunstancias planetarias son favorables. Es más, yo creo que se formará otro universo cada vez que las condiciones astrofísicas sean favorables para tal acontecimiento.

El nacimiento de nuestro tiempo no es, pues, el nacimiento *del* tiempo. Ya en el vacío fluctuante preexistía el tiempo en estado. potencial.

Tal vez seamos aquí tributarios de nuestro lenguaje. El tiempo no es la eternidad, ni el eterno retorno. Y no es solamente irreversibilidad y evolución. Quizá necesitemos hoy una nueva noción del tiempo capaz de trascender las categorías del devenir y de la eternidad.

Desde los inicios de la sociología, los estudiosos se han encontrado con el problema de la dualidad entre sistema e individuo. Conocemos la tentación de los sociólogos clásicos, llevados a una visión totalizadora.*

Hoy comprobamos el papel de las microestructuras, de las decisiones individuales, de las fluctuaciones que se amplifican. En este sentido, curiosamente, la historia de la física parecería de alguna manera complementaria.

La física clásica, cuyo texto canónico es *Le systême du monde* de Laplace, nos invitaba a reconstruir una imagen del mundo superponiendo movimientos simples. A cada movimiento correspondía una no-homogeneidad del espacio-tiempo.

En la cosmología que acabo de exponer, es la totalidad la que desempeña el papel determinante. El hecho singular, individual, sólo se vuelve posible cuando está implicado en semejante totalidad.

* Me permito recomendar la lectura del bello libro de Claude Javeau, *Le petit murmure et le bruit du monde*, Les Éperonniers, Bruselas, 1987.

Llegamos así a un tiempo potencial, un tiempo que está «ya siempre aquí», en estado *latente*, que sólo requiere un fenómeno de fluctuación para actualizarse. En este sentido, el tiempo no ha nacido con nuestro universo: el tiempo *precede a la existencia*, y podrá hacer que nazcan otros universos.

El papel creativo del tiempo

Conferencia dada en Milán el 24 de octubre de 1984, en el ámbito del *Progetto cultura* de Montedison.

El binomio orden-desorden suscita hoy en día numerosas confrontaciones culturales, como señala un texto de Jean Starobinski escrito en ocasión de los Encuentros Internacionales de Ginebra de 1983, cuyo tema era precisamente *Orden y desorden.*

Dice Starobinski: «Hoy no existe ningún campo —ciencias físicas, humanas, creación artística, instituciones jurídicas, vida económica, debates políticos— cuyos problemas no parezcan apelar a las nociones antagonistas del orden y del desorden, o a aquellas, más flexibles pero no por ello menos antinómicas, del equilibrio y del desequilibrio. Todo nos lleva a creer que estas nociones son indispensables para interpretar el conjunto de las realidades que se presentan en nosotros o en torno a nosotros».

En realidad, el interés por los problemas de orden y desorden no es reciente: lo encontramos en científicos, filósofos y poetas. Pensemos, por ejemplo, en los *Cahiers* de Paul Valéry, donde se encuentran numerosos anotaciones, algunas muy profundas, sobre el desorden.

Los aspectos del orden y del desorden son múltiples; algunos son estrechamente científicos, otros se refieren a problemas epistemológicos y filosóficos. Aquí tomaremos en consideración sobre todo los aspectos científicos, es decir, los progresos realizados en la descripción de los fenómenos de orden y de desorden en física y en química.

¿Cómo caracterizar el momento científico en que vivimos hoy? Indudablemente la ciencia conoce nuevos desarrollos en los campos más diversos, pero parece también encontrarse ante una encrucijada: el mundo, ¿es termodinámico o mecánico? Hace algunas decenas de años, esta pregunta habría tenido esta respuesta: el mundo es esencialmente mecánico, la termodinámica tiene un papel secundario. Ahora la respuesta sería más incierta: se han realizado los descubrimientos de las partículas elementales inestables, algunos descubrimientos en cosmología, y todos los del campo de la física del no-equilibrio de los que querría hablar brevemente.

Empecemos preguntándonos qué es lo que caracteriza el pensamiento mecánico, dinámico. Sustancialmente es el intento de aislar un sistema, de considerarlo independientemente del resto del universo. Hay un aspecto importante que debe ser tomado en consideración: los sistemas dinámicos no son nunca estables. Por ejemplo, cuando un cuerpo pasa cerca de la Tierra, la trayectoria de nuestro planeta queda modificada, desplazada, y ya no vuelve a la situación precedente. Por el

contrario, cuando corremos, el corazón acelera los latidos, pero después de haber descansado, reemprende el ritmo inicial. Hay pues una diferencia: en el caso del corazón, tenemos un comportamiento estable, mientras que en el caso de la dinámica hay una forma de inestabilidad.

¿Cómo es en cambio la descripción termodinámica? Se la podría definir como de tipo global: coloca un sistema en su ambiente. La descripción termodinámica introduce además la idea de estabilidad: los matemáticos hablan de estabilidad asintótica. Por el segundo principio de la termodinámica, en efecto, los fenómenos irreversibles conducen a una producción positiva de entropía. Si se perturba un sistema aislado en equilibrio, vuelve después al equilibrio. En el mundo de los fenómenos disipativos se pueden despreciar las perturbaciones, en el mundo de la dinámica no.

De este modo identificamos rápidamente el nexo entre disipación y orden. Si no hubiese estabilidad, el mundo cambiaría de continuo, por lo que no podría existir ninguna organización estable de las estructuras, por ejemplo la de las estructuras biológicas. Por tanto la irreversibilidad es un factor muy relevante.

Se puede plantear el problema de un modo aún más general. Hace aproximadamente 2.500 años, Aristóteles había analizado ya el problema del tiempo (*Física*, Δ 11, 219b 1-2): había advertido que el tiempo era la medida del movimiento en la perspectiva del antes y del después. Y es esto lo que todavía hacemos hoy: medimos el tiempo

con relojes que tienen un movimiento periódico.

Pero, ¿qué es lo que señala el antes y el después? Aristóteles no contestó a esta cuestión. Se preguntaba si no sería el alma la que contase, si no seríamos nosotros los que daríamos la perspectiva del antes y del después, y si de alguna manera no seríamos nosotros mismos los responsables de la existencia de la irreversibilidad en el mundo, como piensan todavía muchos físicos. Pero los desarrollos del estudio de los fenómenos irreversibles nos dan ahora una perspectiva radicalmente distinta. Comprobamos que los fenómenos irreversibles conducen a nuevas estructuras y, desde el momento en que aparecen nuevas estructuras como consecuencia de la irreversibilidad, ya no nos está permitido creer que somos los responsables de la aparición de la perspectiva del antes y del después. Ahora tenemos una visión del tiempo distinta: ya no podemos pensar, con Einstein, que el tiempo irreversible es una ilusión.

Un ejemplo sencillo, la inestabilidad de Bénard, me permitirá ilustrar lo que quiero decir. La inestabilidad de Bénard se verifica en un estrato líquido calentado por debajo; superado cierto valor umbral se crean corrientes de convección, que resultan de la interacción de no-equilibrio entre el flujo de calor y la gravitación. Es interesante destacar que cada celda de convección comprende una cantidad de moléculas del orden de 10^{21}, un número enorme de partículas. El no-equilibrio crea por tanto la coherencia, permitien-

do a las partículas interactuar a larga distancia. Me gusta decir que la materia en proximidad al equilibrio es «ciega», porque cada partícula «ve» solamente las moléculas que la rodean; mientras que en una situación alejada del equilibrio se producen las correlaciones de largo alcance que permiten la construcción de los estados coherentes y que hoy encontramos en numerosos campos de la física y de la química.

La observación próxima de estos fenómenos es rica en implicaciones. En la inestabilidad de Bénard podemos observar por ejemplo un estrato caliente superpuesto a un estrato frío. O bien corrientes de convección dotadas de estructuras coherentes que van por ejemplo de derecha a izquierda, o viceversa. Estas estructuras rompen la simetría euclideana del espacio.

En el equilibrio o cerca del equilibrio, todos los puntos que yacen sobre un mismo plano tienen las mismas propiedades. Lejos del equilibrio aparecen zonas de quiralidad opuesta. Ha habido pues una ruptura de la simetría del espacio del mismo modo que, en los fenómenos temporales, el fenómeno irreversible provoca la ruptura de la simetría del tiempo.

Pero hay más. Si repetimos este experimento en otro momento, las corrientes de convección pueden salir distintas. La situación no está determinada: en la descripción de estos fenómenos emerge un elemento casual.

Sabemos que la mecánica cuántica ha introducido el azar en la física. Sin embargo, el azar

sólo entraba en juego a nivel microscópico, y algunos han sacado la conclusión de que, a nivel macroscópico, el azar resultaría eliminado por la ley de los grandes números. Pero ahora vemos que no es así: el azar permanece esencial incluso a nivel macroscópico.

Cerca del equilibrio siempre es posible linealizar, mientras que lejos del equilibrio tenemos una no-linealidad de los comportamientos de la materia. No-equilibrio y no-linealidad son conceptos ligados entre sí. Tenemos de esta manera nuevos estados físicos de la materia, nuevos comportamientos. Las ecuaciones no-lineales tienen muchas soluciones posibles y por consiguiente una multiplicidad, una riqueza de comportamientos que no se pueden encontrar cerca del equilibrio.

La existencia de estos estados que pueden transformarse el uno en el otro introduce por tanto un elemento histórico en la descripción. Parecía que la historia estuviese reservada a la biología o a las ciencias humanas, y sin embargo la vemos aparecer hasta en la descripción de sistemas extremadamente sencillos, y éste es un hecho de alcance general.

También en estos casos la estructura, la forma del espacio, son distintas en el interior y en el exterior del sistema. Podemos decir, en cierto sentido, que la irreversibilidad crea una diferenciación: el interior del sistema resulta distinto del exterior, exactamente como el interior de un sistema viviente tiene una estructura y una compo-

sición química completamente distinta a la del mundo exterior.

El ejemplo de la inestabilidad de Bénard no es un caso aislado: en los últimos diez años se ha observado también la aparición de estructuras de no-equilibrio en campos distintos al de la hidrodinámica, y en particular en la química. Sólo si hay algún fenómeno autocatalítico o transcatalítico, sólo si hay reacciones que amplifican los fenómenos cinéticos, se pueden encontrar estas estructuras. Uno de los hechos sorprendentes ha sido notar que las reacciones periódicas no son la regla; además de éstas, hay también reacciones de comportamiento muy irregular. Se habla entonces de caos químico.

Hasta ahora los ejemplos han sido extraídos de la hidrodinámica o de la química. Antes de pasar a la biología, quisiera añadir algo sobre los mecanismos matemáticos de formación de estas estructuras. Estas aparecen más allá del punto llamado de bifurcación y pueden romper las simetrías preexistentes.

La biología nos ha puesto delante del siguiente hecho: las moléculas con quiralidad levógira son mucho más numerosas que las moléculas con quiralidad dextrógira. ¿Por qué? Sucede muy a menudo que no hay una simetría perfecta. Hay alguna imperfección que permite selecciones extremadamente precisas, que permite resultados reproducibles incluso cuando la relación señal-ruido es muy baja.

Tomemos un ejemplo: ¿cómo hace una planta

para conocer la llegada de la primavera? La verdad es que la temperatura, como la luz, varía mucho de la mañana a la tarde o del día a la noche; pero de todo este ruido, emerge una pequeña señal que la planta es capaz de captar. Así comenzamos a entender cómo esta señal puede ser amplificada.

Esta previsión ha sido verificada experimentalmente en sistemas sencillos en fechas muy recientes. No es imposible que se llegue a los que podrían definirse como *transistores* químicos, capaces de amplificar las señales procedentes del mundo externo. Un descubrimiento de este tipo abriría seguramente inmensas posibilidades tecnológicas. No se trataría de interruptores muy rápidos, pero sí de interruptores sensibilísimos.

Pero volvamos a la biología, un mundo donde estas amplificaciones y estas estructuras de no-equilibrio son moneda corriente. Se las encuentra casi en todas partes, y en particular en la química de los enzimas. Un famoso ejemplo es el de las amebas llamadas acrasiales: viven aisladas, pero en el momento en que tienen hambre, se agregan en un «organismo» único que después emigra hacia un ambiente más favorable. Este mecanismo de agregación está ligado al gradiente de concentración de una sustancia llamada AMP cíclico, producida por un enzima y que después se difunde en el ambiente. Nos encontramos ante un fenómeno de amplificación: la presencia del enzima en el ambiente activa el mecanismo que produce el *AMP* cíclico; de esta manera se emiten ondas

que son amplificadas y que dan lugar a magníficas formas geométricas.

Todos estos son ejemplos muy sencillos. Sólo muy recientemente los biofísicos y los químicos se han interesado en los casos en que los mecanismos de retroacción son múltiples. Un sistema puede presentar dos o más mecanismos de amplificación: por esta razón serán posibles más tipos de ciclo-límite, más ritmos —se habla de birritmicidad o polirritmicidad— y este fenómeno, previsto teóricamente hace tres o cuatro años, ha sido verificado en el campo de la bioquímica y de la química inorgánica.

Son situaciones donde el sistema adopta ritmos distintos según cuáles sean las condiciones.

La irreversibilidad conduce por tanto a la *autonomía*: cambios extremadamente débiles en el medio externo pueden llevar a comportamientos internos completamente distintos, abriendo la posibilidad de que el sistema se adecue al mundo externo. Todo esto corresponde a una definición de la vida: la vida no se nutre solamente de química, sino que en cierto modo ha incorporado la gravitación, el campo electromagnético, etcétera.

Uno de los aspectos en los que querría entretenerme es el de la estabilidad ligada a la irreversibilidad. Tomemos un péndulo: si no hubiese rozamiento, continuaría oscilando hasta el infinito. En cambio el movimiento se atenúa y llega al reposo: se dice que es un punto atractor, un ejemplo de estabilidad asintótica. Pero la sorpresa de estos últimos años es el descubrimiento de

que un punto atractor no es un ejemplo representativo.

Está el caso un poco más complejo, no de un único punto atractor, sino de una curva cerrada que traduce un comportamiento periódico. Se ha descubierto hace poco que el punto atractor es, a menudo, un conjunto de puntos, y que el sistema es atraído primero por un punto, después por otro, y todavía por otro. Se habla entonces de un atractor extraño.

Los atractores extraños pueden poblar de manera más o menos densa líneas, superficies, volúmenes. Pueden tener dimensiones que no se expresan con números enteros, porque se distribuyen densamente en el interior de volúmenes o de superficies. Se denominan fractales, porque su dimensión (en el sentido de la geometría) no es un número entero. Con los atractores fractales uno puede esperar comportamientos muy irregulares, caóticos, y continuas fluctuaciones. Pero, nos podemos preguntar: los fenómenos caóticos que observamos, ¿son de naturaleza fractal o más bien de la naturaleza de los juegos de azar?

Cuando juego a la ruleta, puedo haber jugado mil veces, y jugar la mil y una vez, pero la situación es cada vez nueva, no queda nada del pasado. Mientras que cuando tengo un sistema dinámico, incluso el carácter casual es el resultado del propio sistema dinámico. Lo que siempre me impresiona es que en la naturaleza se encuentra estabilidad donde se espera encontrar variedad, y se encuentra variedad allí donde en cambio

se espera estabilidad. Comprobamos, por ejemplo, que el mundo está hecho de partículas de materia, pero, ¿por qué no de antimateria? ¿Por qué la materia es tan abundante y la antimateria tan escasa? ¿Por qué hay tantas moléculas de quiralidad levógira y tan pocas moléculas de quiralidad dextrógira? Y del mismo modo, allí donde pensamos encontrar estabilidad, encontramos en cambio variedad, como en el caso del clima: durante largos períodos la energía recibida del Sol ha sido prácticamente constante, y sin embargo se verifican enormes variaciones climáticas. ¿Qué quiere decir todo esto? El problema está siendo examinado hoy por varios grupos de investigadores, entre ellos el nuestro, y haré un esbozo de algunos de los resultados conseguidos. En el caso del clima, conocemos el pasado a través de la serie temporal, por ejemplo la secuencia de las temperaturas. Esta secuencia presenta enormes variaciones. Lo que nos preguntamos es si estas variaciones son debidas a un juego de azar, como la ruleta, o nos encontramos ante un atractor extraño parecido a los que he citado antes.

En los últimos años los matemáticos han empezado a desarrollar métodos para distinguir entre estas dos situaciones. La idea de fondo es que, si la temperatura forma parte de un sistema con cierto número de variables, entonces, eliminando estas variables, la temperatura pasa a formar parte de una ecuación diferencial de enésimo orden. Dando el valor de una variable, así como el de sus sucesivas derivadas hasta el orden n-1, la

ecuación determina la derivada enésima. Se puede también tomar el valor de la temperatura en un instante determinado y en momentos sucesivos hasta obtener una secuencia. Estudiando después el comportamiento de esta secuencia, se observa que en presencia de un atractor extraño las secuencias se colocan en zonas con cierta dimensionalidad. Sin entrar en los detalles de los cálculos matemáticos, podemos destacar que el interés fundamental, independientemente del modelo climático concreto, reside en el hecho de que ahora podamos afirmar que la información contenida en un millón de años de temperaturas puede ser simulada en un sistema con cuatro ecuaciones diferenciales no-lineales. ¿Cuáles son las cuatro variables que producen este atractor? Nada sabemos: podemos hacer la hipótesis del campo magnético, de la cantidad de oxígeno, de la posición de la trayectoria terrestre. Pero sabemos que no se trata de un juego de azar, que en la base de la enorme complejidad existente en las fluctuaciones de las temperaturas hay un determinismo complejo. Esta complejidad, reflejada por el atractor, explica la inestabilidad del clima: la menor perturbación proveniente del mundo externo o de fluctuaciones internas puede hacer oscilar de un clima frío a un clima cálido y viceversa.

Si esta formulación «funciona» para el clima, ¿por qué no intentar aplicarla a otro fenómeno complejo, a las fluctuaciones del potencial eléctrico del cerebro? Se puede aplicar a la neurofisiología el mismo método usado para el clima, es decir, estudiar el potencial eléctrico sucesivo

en función del potencial eléctrico precedente. Lo que se observa es que para un individuo en estado de vigilia, el carácter casual es enorme: a un valor dado puede corresponderle otro valor cualquiera. En el sueño profundo, en cambio, la situación es mucho menos casual.

Podemos, por tanto, intentar analizar la diferencia entre vigilia y sueño desde el punto de vista de los atractores extraños. Parece que el sistema neurofisiológico es un sistema altamente inestable que sigue funcionando durante el sueño como un sistema dinámico muy complejo. El propio Valéry escribe: «El cerebro es la inestabilidad misma». Pero, ¿qué sucede cuando se pasa del estado de sueño al de vigilia? No tenemos todavía suficientes datos, pero emergen claramente dos hechos: en primer lugar, la dimensionalidad aumenta y el sistema se hace más complejo. En segundo lugar, no se trata ya de un sistema dinámico cerrado: en estado de vigilia, miramos, observamos, y estas observaciones hacen que el sistema ya no sea completo, cerrado sobre sí mismo, sino que contenga elementos nuevos venidos del mundo externo. En el estado de vigilia hay una aportación continua de la experiencia.

No soy neurofisiólogo, pero estoy fascinado por el hecho de que se haya encontrado en el cerebro una actividad de base altamente inestable, como en el caso del clima. El mundo externo permite polarizar esta actividad de base en una dirección u otra y llegar a la actividad cognitiva.

Se nos puede preguntar ahora si la autonomía

del tiempo no desarrolla un papel muy importante en la evolución biológica. ¿Cuál es el papel del tiempo? Tenemos el tiempo astronómico, el tiempo de la dinámica, y dado que dentro de nosotros se desarrollan continuamente reacciones químicas, tenemos también un tiempo químico interno. Pero el tiempo químico es un tiempo pobre, que solamente existe mientras se alimenta la reacción. Con la vida, la situación cambia radicalmente; con la inscripción del código genético tenemos un tiempo interno biológico que prosigue a lo largo de los miles de millones de años de la vida misma, y este tiempo autónomo de la vida no sólo se transmite de una generación a otra, sino que su mismo concepto se modifica. Se produce un perfeccionamiento evolutivo que evoca la historia de los ordenadores: una generación sucede a la otra y permite realizar el mismo tipo de operaciones en tiempos cada vez más breves. Podemos llamarlo un perfeccionamiento cuantitativo. Pero parece también claro —todavía se están recogiendo los datos— que en el curso de la evolución biológica ha cambiado la cualidad del sistema dinámico, con un aumento de complejidad que tiende hacia sistemas altamente inestables (un ejemplo es el cerebro de los primates, cuya inestabilidad permite amplificaciones y polarizaciones en cualquier dirección).

Aquí también vemos la irreversibilidad en acción, en la autonomía de los seres que tienden a hacerse cada vez más independientes del mundo externo.

Esta complejidad y esta autonomía encuentran, a mi parecer, el mejor ejemplo en el tiempo musical. En cinco minutos mecánicamente medidos de una composición de Beethoven hay tiempos más lentos, acelerados, vueltas atrás, premisas de lo que sucederá a continuación, todo esto en los cinco minutos del tiempo astronómico.

Es esta preparación para la complejidad y la autonomía del tiempo musical lo que vemos emerger en el transcurso de la evolución y que podemos comprender como la historia de los atractores. Por este motivo he centrado mi conferencia en la noción de atractor, desde el ejemplo más trivial, el rozamiento, a los atractores complejos de la neurofisiología y del clima.

He dicho que la vida ha creado el tiempo, pero esto ha podido suceder gracias a la creación de las biomoléculas. En realidad, la probabilidad de las secuencias de polímeros es extremadamente distinta cerca del equilibrio y lejos del equilibrio: cerca, sería nula, lejos, se hace apreciable. Se puede por tanto decir que las biomoléculas son moléculas orgánicas cuya simetría ha sido rota por la irreversibilidad (de hecho hay que leer las biomoléculas en cierto orden, de izquierda a derecha, tal como se lee este texto). Esta ruptura de la simetría espacial es la expresión de la ruptura de simetría entre pasado y futuro. En todos los fenómenos que observamos, vemos el papel creativo de los fenómenos irreversibles, el papel creativo del tiempo.

En la concepción clásica, la irreversibilidad

estaba ligada a la entropía, y ésta a su vez a una probabilidad. Pero, ¿cómo se entendía la probabilidad? Para los que, como Boltzmann, habían tenido la idea de expresar la irreversibilidad a través de una probabilidad, la respuesta era evidente: la probabilidad nacía de nuestra ignorancia de las trayectorias exactas. De manera que la irreversibilidad es la expresión de nuestra ignorancia.

Hoy, ante el papel creativo de los fenómenos irreversibles, esta concepción no puede sostenerse: de lo contrario estaríamos obligados a atribuir las estructuras que observamos a nuestra ignorancia. Es verdad que la ignorancia es madre de muchas desgracias, pero se hace muy difícil atribuirle el poder de crearnos. Tenemos pues que superar la tentación de la ignorancia, como hemos superado la tentación de explicar la mecánica cuántica por las variables ocultas.

Entonces, ¿cuál es el camino? Hoy sabemos que en los sistemas dinámicos inestables, la noción de trayectoria pierde su sentido: dos puntos, tan próximos como queramos, se alejarán exponencialmente, según un número llamado «exponente de Lyapunov». La inestabilidad destruye el carácter de las trayectorias y modifica nuestros conceptos de espacio-tiempo. Einstein ya había reconocido explícitamente que los problemas del espacio-tiempo y de la materia estaban relacionados. Ahora debemos ir más allá, entender que la estructura del espacio-tiempo está ligada a la irreversibilidad,

o que la irreversibilidad expresa también una estructura del espacio-tiempo.

El mensaje del segundo principio de la termodinámica no es un mensaje de ignorancia, es un mensaje sobre la estructura del universo. Los sistemas dinámicos que están en la base de la química, de la biología, son sistemas inestables que se dirigen hacia un futuro que no puede ser determinado a priori porque tenderán a cubrir tantas posibilidades, tanto espacio, como tengan a su disposición.

Tenemos que examinar el sentido del segundo principio: en vez de un principio negativo, de destrucción, vemos emerger otra concepción del tiempo. La física clásica había producido solamente dos nociones de tiempo: el «tiempo-ilusión» de Einstein, y el «tiempo-degradación» de la entropía. Pero estos dos tiempos no se aplican a la situación actual. En sus primeros instantes, el universo, todavía muy pequeño y muy caliente, era un universo de equilibrio. Ahora se ha transformado en cambio en un universo de no-equilibrio. La misma existencia de materia y no de antimateria es prueba de una ruptura de simetría. La mecánica, que trata de puntos materiales, se ocupa en realidad de una de las manifestaciones de la irreversibilidad. No habría puntos materiales, no habría objetos en un universo en equilibrio. La evolución del universo no ha sido en la dirección de la degradación sino en la del aumento de la complejidad, con estructuras que aparecen progresivamente a cada nivel, de las estrellas y las galaxias a los sistemas biológicos.

Los hay que creen saber que el porvenir del universo sólo podrá ser una repetición suya, según la idea de que el tiempo no es más que una ilusión; o bien consistirá en una inevitable decadencia, debida al agotamiento de los recursos, como prevé la termodinámica clásica. La realidad del universo es más compleja: a tiempos largos y a nivel cosmológico están implicadas tanto la gravitación como la entropía, y el juego de la gravitación y la entropía está muy lejos de haber sido aclarado. Se puede ya pensar a partir de ahora que, una vez aclaradas estas relaciones más complejas, la idea de llegar a saber si el universo se reproducirá indefinidamente, o bien se degradará hasta desaparecer por disipación, aparecerá demasiado simplista. La dialéctica entre la gravitación y la termodinámica puede generar muchas posibilidades, y después de algunos siglos de física llegaremos a una situación más razonable, que tenga en cuenta la complejidad que nos rodea.

No podemos prever el porvenir de la vida, o de nuestra sociedad, o del universo. La lección del segundo principio es que este porvenir permanece abierto, ligado como está a procesos siempre nuevos de transformación y de aumento de la complejidad. Los desarrollos recientes de la termodinámica nos proponen por tanto un universo en el que el tiempo no es ni ilusión ni disipación, sino creación.

Últimos títulos

27. Controversias sobre las distancias cósmicas y los cuasares, Halton Arp

28. El porvenir está abierto, Karl R. Popper y Konrad Lorenz

29. Las edades de Gaia, James Lovelock

30. Materia de reflexión, Jean-Pierre Changeux y Alain Connes

31. Más allá de los números, John Allen Paulos

32. La ciencia natural del hombre, Konrad Lorenz

33. La evolución y sus metáforas, Jordi Agustí

34. Interacciones, Sheldon L. Glashow

35. De Eros a Gaia, Freeman Dyson

36. Correspondencia, Albert Einstein/Michele Besso

37. El encanto de la física, Sheldon L. Glashow

38. El quark y el jaguar, Murray Gell-Mann

39. Microcosmos. Lynn Margulis y Dorion Sagan

40. Inventar. Norbert Wiener

41. Complejidad. Roger Lewin

42. La lógica de las extinciones. Jordi Agustí, Michael J. Benton, Douglas H. Erwin, David Jablonski, Erle G. Kauffman, Kazimierz Kowalski y Ramón Margalef

43. La tercera cultura, edición de John Brockman

44. Un matemático lee el periódico. John Allen Paulos

45. ¿Qué es la vida?, Lynn Margulis y Dorion Sagan

46. Razón y placer, Jean-Pierre Changeux

47. Cuestiones vitales, Henri Atlan y C. Bousquet

48. La naturaleza y los griegos, Erwin Schrödinger

49. La geometría fractal de la naturaleza, Benoît Mandelbrot

50. La sexta extinción, Richard Leakey y Roger Lewin

51. Las manchas del leopardo, Brian Goodwin

52. El progreso. ¿Un concepto acabado o emergente?, Jordi Agustí, Pere Alberch, Brian Goodwin, David Hull, Ramón Margalef, Michael McKinney, Michael Ruse y Jorge Wagensberg

53. Escalando el monte Improbable, Richard Dawkins

54. Ideas para la imaginación impura, Jorge Wagensberg